G. E. LHEUREUX
E. J. BELOTTE

le soudage par résistance

LE SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

PAR

Gérard E. LHEUREUX
Ingénieur technicien VTIM
Electricien Mécanicien Soudeur
Adjoint à la Direction Générale
de la S. A. ELECTROMÉCANIQUE, Bruxelles
Directeur technique de la
S. A. ELECTROMÉCANIQUE-ESPAÑOLA
Zarauz (Espagne)

Edgard J. BELOTTE
Ingénieur technicien IGLg
Chef du service « Production » de la
S. A. ELECTROMÉCANIQUE, Bruxelles

DUNOD
PARIS
1965

© Dunod, 1964

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION (Historique et développement du soudage par résistance) 1

CHAPITRE I

LES TECHNIQUES DE SOUDAGE DES MÉTAUX

Le soudage des métaux . . . 6
Définition . . . 6
Soudage hétérogène 7
Soudage autogène . 8
Moyens de chauffage . 9
Procédés utilisant :
— la transformation d'une énergie chimique en énergie calorifique. 11
— la transformation d'une énergie électrique en énergie calorifique 13
— l'énergie électrique et chimique 25
Autres procédés . . 25

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

Possibilités générales . 27
Principales techniques . 28

CHAPITRE III

LE SOUDAGE PAR POINTS

Définition et but . 35
Principe général . 37
Théorie 38
Principes fondamentaux 38
Résistances de contact 40
Processus de formation du point de soudure . 49
Rôle de l'effort de compression 55
Aspect métallurgique 57

Étude des paramètres 67
Intensité du courant de soudage et temps de soudage 68
Dimensions des pointes d'électrodes 83
Effort de compression aux électrodes 85

Machines à souder par points . 91
Classification 91
Eléments généraux 93
Bâti 93
Transformateur monophasé 95
Dispositifs de mise en mouvement et en pression des électrodes . 113
Electrodes et porte-électrodes 127

Appareillage électronique de commande 135
Contacteur électromagnétique . . . 135
Contacteur ionique 141
Appareil électronique asynchrone . . 144
Appareil électronique synchrone . . 149

Résistance mécanique des points de soudure . 165

CHAPITRE IV

TECHNIQUES ET PROCÉDÉS PARTICULIERS DÉRIVÉS DU SOUDAGE PAR POINTS

Transformateurs et pinces de soudage 189
Ensemble transformateur — pince : Schéma électrique . . 191
Description des organes 193

Soudage multipoint . 211
Principe. . 211
Description 213

Soudage par bossages . 229
Généralités et principes . . 229
Types de bossages . . . 231
Paramètres de soudage . . 239
Presses à souder et outillages 247

Brasage . 277
Définition 277
Principe. 278
Postes à braser. . . . 281
Technique du brasage . 284
Possibilités et avantages . 287

CHAPITRE V

LE SOUDAGE AU GALET

Définition et but . . . 297
Principe général . . . 298
Théorie . . . 301
Principes fondamentaux . . . 301
Résistances de contact . . . 303
Processus de formation d'une soudure au galet . 305
Rôle de l'effort sur soudure . . . 306
Aspect métallurgique . . . 307
Étude des paramètres . . 309
Machines à souder au galet . 329
Classification . . 329
Eléments . . . 329

CHAPITRE VI

PROCÉDÉS PARTICULIERS DE SOUDAGE AU GALET

Soudage par écrasement 343
Soudage en bout, avec apport de métal . 347
Soudage bout à bout par refoulement 349
Soudage par fusion des bords . 353

CHAPITRE VII

LE SOUDAGE EN BOUT

Définition 355
But 357
Classification et principes . . . 357
Soudage en bout par résistance pure . . 359
Soudage en bout par étincelage 363
Description du procédé . 363
Aspect métallurgique . . 373
Paramètres 379
Avantages 401
Machines à souder en bout 403
Classification . . 403
Eléments généraux 405

CHAPITRE VIII

LES SOLUTIONS TRIPHASÉES

Machines à énergie accumulée 435
Machine à énergie électromagnétique 437
Machine à énergie électrostatique 439
Systèmes basés sur un changement de fréquence 441
Machines à redresseurs . 445
Branchements spéciaux 450
Branchement Scott 450
Équilibrage et compensation d'une charge monophasée sur un réseau triphasé 451

CHAPITRE IX

LE BRANCHEMENT DES MACHINES A SOUDER ET LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN SOUDAGE

Branchement des machines à souder 455
Définitions 456
Câbles d'alimentation 461
Fusibles du circuit de puissance . 464
Sectionneurs 465
Transformateur d'alimentation . . 467
Consommation électrique en soudage . 471
Soudage par points 471
Soudage au galet 472
Soudage en bout 473

CHAPITRE X

CALCUL DES CIRCUITS DE SOUDAGE

Critères de détermination des caractéristiques électriques . . 475
Circuit électrique d'une machine à souder 477
Résistance du circuit extérieur 481
Réactance du circuit extérieur 483
Exemple de calcul d'impédance du circuit extérieur . . . 489
Résistance et réactance du transformateur 491
Puissance du transformateur 496
Matières magnétiques composant le noyau du transformateur . 500
Adaptation des calculs à des fréquences différentes de 50 Hz . 502
Machines alimentées par réseau triphasé 503
Débit d'eau de refroidissement des circuits électriques . . . 514

CHAPITRE XI

LA CONCEPTION DES OUTILLAGES

Définitions 517
Choix des matériaux 525
Isolation 527
Dimensions des outillages et gabarits . 528
Remplacement et changement d'outillage 528
Dégagement des pièces soudées . . . 529
Refroidissement 530
Résistance mécanique 531
Usure 531
Densités de courant admissibles . . 532
Projections 532

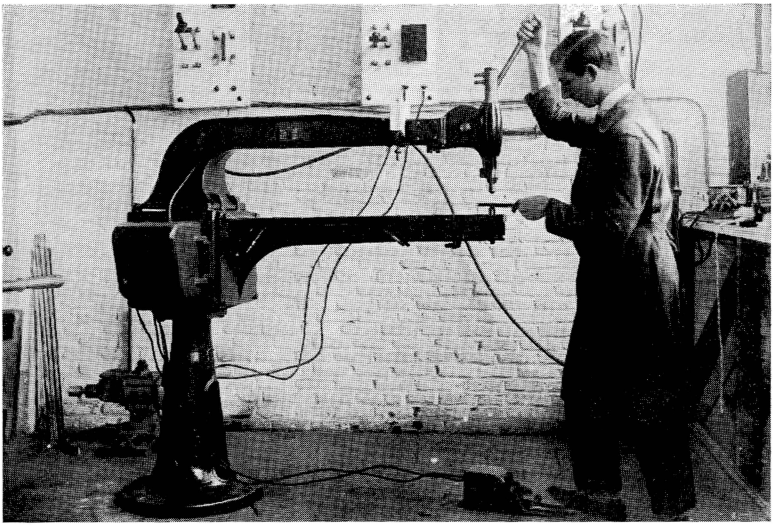


Fig. 1.
Petite machine à souder par points, à pression manuelle, fabriquée en 1922

INTRODUCTION

HISTORIQUE ET DÉVELOPPEMENT DU SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

Le soudage au feu de forge et les soudures tendres à l'étain sont les deux procédés d'assemblage par soudage les plus anciens.

Leurs origines sont incertaines, mais des découvertes archéologiques faites en Egypte, en Grèce et en Asie, témoignent de l'utilisation, par les artisans de l'Antiquité, de ces deux formes d'assemblage. Des vases métalliques soudés à l'étain, datant du XII^e siècle avant Jésus-Christ, ont été retrouvés dans les ruines troyennes.

Le soudage au feu de forge, ou soudage à l'état plastique, était déjà employé en Grèce il y a trois mille ans environ, pour la fabrication d'armes, d'outils et d'ustensiles de ménage.

Constamment améliorées durant les siècles, ces techniques furent à peu près les seules utilisées jusqu'à la fin du XIX^e siècle, et elles subsistent encore de nos jours. Ce n'est qu'au cours du XIX^e siècle et au début du XX^e, que furent découvertes et appliquées les grandes méthodes modernes de soudage.

En 1877, au cours d'une expérience faite devant son auditoire, le professeur Elihu Thomson, de l'Institut Franklin, découvrit fortuitement le principe du *soudage électrique par résistance.* Il chargeait des condensateurs à l'aide

d'une bobine d'induction à deux enroulements, alimentée par une batterie. Cette batterie était connectée aux extrémités de l'enroulement primaire par l'intermédiaire d'un rupteur, tandis que les condensateurs étaient raccordés aux bornes de la bobine secondaire, comportant un nombre de spires supérieur à celui de la bobine primaire et faite de fil plus fin.

Une tension élevée, égale à la tension de l'extra-courant de rupture dans le primaire, multipliée par le rapport entre le nombre de spires secondaires et primaires, était ainsi induite dans la bobine secondaire.

Les condensateurs étaient donc alimentés par une décharge à haute tension.

Au cours de sa démonstration, Thomson pensa qu'il serait intéressant de procéder à l'expérience inverse.

Pour cela, il connecta les condensateurs, chargés au préalable, aux bornes de la bobine secondaire en fil fin, tandis que l'enroulement primaire en fil de section plus forte avait ses extrémités en simple contact.

La décharge de courant dans l'enroulement secondaire donna lieu à une tension induite dans le primaire. Le courant électrique circulant dans le circuit primaire fermé, provoqua la fusion des extrémités en contact, qui furent soudées l'une à l'autre.

Le principe d'un nouveau mode d'assemblage par soudage électrique était découvert : la résistance ohmique formée par le contact de deux pièces métalliques, traversées par un courant électrique, peut donner lieu, dans certaines conditions, à un dégagement de chaleur par effet Joule, suffisant pour porter les surfaces en contact à la température de soudage.

Cependant ce n'est qu'en 1886 que le professeur Thomson reprit ses expériences sur le soudage par résistance, afin d'en vérifier les possibilités pratiques.

A cette époque, il perfectionna le procédé et fit couvrir son invention par un brevet.

De la découverte de ce simple procédé, trois grands modes de soudage par résistance devaient prendre naissance dans un avenir plus ou moins éloigné :

— le soudage en bout,

— le soudage par points,

— le soudage au galet ou à la molette.

L'intérêt et les avantages d'une grande invention ne sont jamais reconnus immédiatement par la pratique industrielle et à leurs débuts, les techniques de soudage par résistance ne se développèrent que très lentement.

C'est seulement vers 1898, qu'apparut la toute première utilisation du soudage par points dans la fabrication d'ustensiles de cuisine : pour la fixation d'oreillons, manches et poignées aux corps de récipients.

Tant aux Etats-Unis qu'en Europe, l'industrie commence néanmoins à entrevoir les possibilités extraordinaires du nouveau procédé.

Vers 1915, la construction des carrosseries automobiles en tôles d'acier offrit un nouveau champ d'applications au soudage par résistance, qui marqua de nouveaux progrès.

Le soudage par résistance, technique complexe, ne pouvait vraiment s'étendre et se perfectionner que par l'étude approfondie des phénomènes

électriques, métallurgiques et mécaniques, qui interviennent dans la formation d'une soudure et les améliorations apportées dans la construction des machines à souder.

La création de centrales électriques et l'établissement de nouveaux réseaux de distribution d'énergie électrique rendirent possible l'extension des applications des machines à souder par résistance alimentées en courant alternatif. Ce n'est cependant que vers 1930, que les techniques de soudage par résistance s'imposèrent d'une façon définitive comme moyens de productions économiques et sûrs, et à partir de cette date, d'année en année, des progrès sérieux furent enregistrés dans leur utilisation.

Durant la seconde guerre mondiale, pressée par le besoin impératif de produire en masse, l'industrie américaine fit un large emploi du soudage par résistance; on découvrit de nombreuses applications nouvelles.

Citons comme exemple, la construction aéronautique, pour laquelle la proportion des assemblages soudés par résistance par rapport aux assemblages rivés, passa de quelques pour cents à une moyenne de 30 %.

L'essor extraordinaire pris par le soudage par résistance ces dernières années est dû en grande partie au contrôle électronique.

Seul l'ignitron est capable d'enclencher et de couper des courants électriques d'intensité élevée, avec une précision rigoureuse.

Le contacteur électronique et les circuits de contrôle électronique sont les auxiliaires indispensables des machines à souder par résistance.

Ils leur ont apporté la précision nécessaire aux réglages des temps et des intensités de courant de soudage.

Les techniques de soudage par résistance sont appliquées dans tous les domaines de l'industrie de transformation des métaux et certaines fabrications modernes sont basées entièrement sur l'utilisation de ces procédés.

Ne citons comme exemple que la construction automobile.

Une usine moderne de construction automobile compte des centaines de soudeuses par résistance.

La carrosserie et le châssis d'une voiture automobile moyenne comportent quelque 10 000 points de soudure.

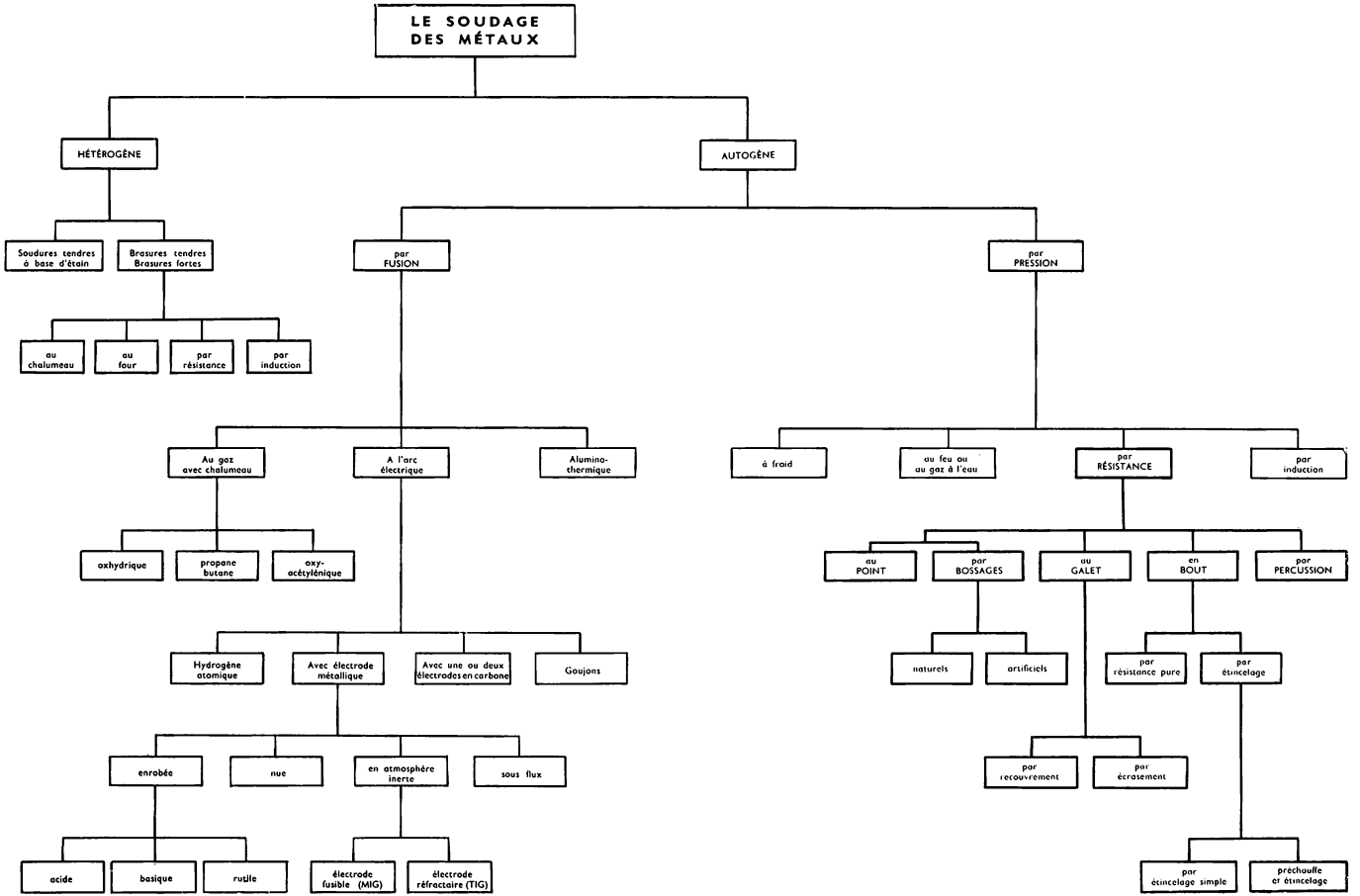
Les jantes et les ponts-arrières sont soudés en bout par étincelage. Les pots d'échappement et les réservoirs à essence sont soudés au galet. L'ampleur prise par le soudage par résistance dans toutes les branches de l'activité industrielle s'explique par les raisons suivantes :

— ce procédé est l'un des principaux facteurs techniques de productivité dans le travail des métaux. Les Etats-Unis d'Amérique, dont l'efficacité dans le domaine de la productivité est bien connue, sont en tête des pays industriels pour l'utilisation des procédés de soudage par résistance;

— il offre la possibilité d'assembler des pièces qui par leurs formes particulières ne peuvent être soudées par aucun autre moyen;

— il garantit l'obtention de joints aux caractéristiques mécaniques et métallurgiques sévèrement déterminées;

— la conception des machines permet de les rendre complètement automatiques et de les intégrer dans des chaînes d'assemblage ou dans un complexe d'automation.


LE SOUDAGE DES MÉTAUX
HÉTÉROGÈNE
AUTOGÈNE
Soudures tendres à base d'étain
Brasures tendres Brasures fortes
au chalumeau
au four
par résistance
par induction
par FUSION
par PRESSION
Au gaz avec chalumeau
A l'arc électrique
Alumino-thermique
oxhydrique
propane butane
oxy-acétylénique
Hydrogène atomique
Avec électrode métallique
Avec une ou deux électrodes en carbone
Goujons
enrobée
nue
en atmosphère inerte
sous flux
acide
basique
rutile
électrode fusible (MIG)
électrode réfractaire (TIG)
à froid
au feu ou au gaz à l'eau
par RÉSISTANCE
par induction
au POINT
par BOSSAGES
au GALET
en BOUT
par PERCUSSION
naturels
artificiels
par résistance pure
par étincelage
par recouvrement
par écrasement
par étincelage simple
préchauffe et étincelage

CHAPITRE I

LES TECHNIQUES DE SOUDAGE DES MÉTAUX

Le tableau de la page 4 donne un aperçu des principaux procédés de soudage utilisés par la technique moderne. Il montre la place importante occupée par le soudage par résistance et sa localisation parmi les autres procédés.

Avant d'aborder l'étude détaillée du soudage par résistance, objet de ce traité, nous croyons utile d'exposer succinctement les principes généraux des diverses techniques de soudage, afin de faire ressortir leurs avantages et inconvénients.

I

LE SOUDAGE DES MÉTAUX

DÉFINITION

Le soudage en général est l'un des moyens d'assemblage utilisés dans la construction mécanique et métallique, au même titre que les assemblages par vis ou boulons, le rivetage, le sertissage, etc.

C'est une opération consistant à joindre deux ou plusieurs pièces en métal en les amenant à une température déterminée, avec ou sans métal d'apport, avec ou sans application de pression, de façon à réaliser une union moléculaire intime, totale, étanche en un endroit donné.

La température à atteindre peut être la température de fusion, la température de forgeage ou une température inférieure, comme c'est le cas par exemple pour le brasage ou le soudage à froid.

On peut classer les divers procédés de soudage en deux grandes catégories :

Le soudage hétérogène.

Le soudage hétérogène, ou soudage par l'intermédiaire d'éléments métalliques de composition tout à fait différente de celle des métaux à assembler.

Le soudage autogène.

On distingue :

a) le soudage autogène par métal d'apport de même composition ou de composition similaire à celle des matériaux à assembler;

b) le soudage autogène sans métal d'apport.

LE SOUDAGE HÉTÉROGÈNE

Le soudage hétérogène se réalise par l'interposition entre les faces à joindre, d'un alliage d'apport de nature et de composition tout à fait différentes de celles des métaux de base (de là, le nom hétérogène).

L'alliage d'apport, caractérisé par une température de fusion nettement inférieure à celle des matériaux à assembler, sert de ciment métallique entre les deux pièces. On distingue :

Les soudures tendres.

Les soudures tendres, généralement à base d'étain, à point de fusion très bas (200 °C), de résistance mécanique faible. Elles sont habituellement utilisées pour l'exécution de certaines connections électriques (courant faible), la fermeture étanche des boîtes de conserves, etc. Les matériaux soudés de cette façon sont les fers blancs, le plomb, le cuivre, le laiton, le zinc. Les moyens de chauffage mis en œuvre sont les fers à souder (ordinaires ou électriques, fig. 2), le chalumeau, le four.

Les brasures tendres.

Les brasures tendres, caractérisées par un point de fusion du matériau d'apport de l'ordre de 250 à 330 °C et de résistance mécanique supérieure à celle des soudures à l'étain. Citons les brasures à base d'argent, d'étain, de plomb, de cadmium, etc.

Les brasures fortes.

Les brasures fortes, caractérisées par un point de fusion de l'alliage d'apport compris entre 600 °C et 900 °C. Citons ici, le bronze tobin, les alliages ternaires : argent, cuivre, zinc, etc.

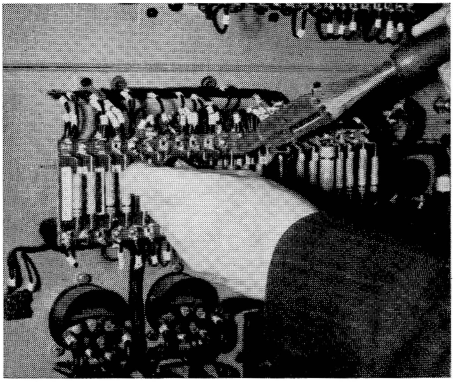


Fig. 2
Soudage de connexions à l'aide d'un fer électrique.

Les alliages d'apport et les décapants utilisés dépendent de la nature des métaux à assembler.

Les régions à braser et la brasure sont portées, dans des conditions déterminées, à la température de fusion de la brasure qui, par effet capillaire, pénètre ou se distribue plus parfaitement dans l'intervalle existant entre les pièces à assembler.

Pendant la solidification, la brasure réalise une excellente liaison par « accrochage » des surfaces des deux métaux, grâce à la pénétration moléculaire superficielle entre l'alliage d'apport et les matériaux à braser.

Il est à noter que pendant le chauffage, les métaux à joindre par brasage restent à l'état solide.

Pendant l'opération de brasage, il est souvent nécessaire d'ajouter un flux décapant. Le rôle de ce décapant consiste :

a) à protéger les surfaces à braser et la brasure de l'oxydation;

b) à dissoudre les oxydes qui pourraient se former pendant le chauffage;

c) à faciliter la pénétration de la brasure en augmentant sa fluidité.

Suivant la source de chaleur utilisée pour amener la brasure et les pièces à braser à la température voulue, on distingue :

— le brasage au chalumeau,
— le brasage au four,
— le brasage par induction,
— le brasage par résistance.

Ces divers modes de chauffage, qui s'appliquent également aux procédés de soudage autogène, seront décrits ultérieurement.

LE SOUDAGE AUTOGÈNE

Le soudage autogène se caractérise par le fait que le joint est réalisé soit sans métal d'apport, soit avec métal d'apport, de même composition ou de composition similaire à celle des métaux à unir.

Les molécules des zones portées à la température de fusion ou de forgeage se sont intimement mêlées.

Les joints ainsi obtenus sont de même nature métallurgique et de mêmes caractéristiques physiques et mécaniques que les métaux de base.

Le soudage autogène consiste donc à amener deux réseaux cristallins à n'en faire plus qu'un. Il comprend deux modes de soudage :

— Le soudage par fusion,
— Le soudage par pression.

Les soudures accompagnées de fusion ne requièrent généralement pas l'application de pression. Quand la pression est appliquée à une soudure ayant une zone portée à la fusion, le métal liquide doit être confiné dans une masse solide. Dans le cas de l'acier, la température à l'endroit du joint pendant l'opération de soudage est donc supérieure à 1 500 °C. Les soudures autogènes peuvent ainsi être réalisées sans fusion. Elles sont alors appelées soudures par pression. Dans ce cas, les zones à souder sont portées à une température inférieure au point de fusion (par exemple jusqu'au blanc pour l'acier), puis une pression de forgeage est appliquée sur les faces portées à la température voulue.

Cette pression sert à amener les molécules des deux pièces dans leurs sphères d'attraction respectives.

II

MOYENS DE CHAUFFAGE

Les moyens de chauffage utilisés pour amener les pièces à souder à la température voulue sont nombreux. En général, les procédés de soudage portent le nom du mode de chauffage utilisé. Un même mode de chauffage peut parfois s'appliquer à plusieurs procédés de soudage (brasage, soudage par fusion, soudage par pression).

On peut ainsi classer les divers procédés de soudage d'après la forme d'énergie mise en œuvre pour engendrer les calories :

Energie chimique :

1. Soudage au feu de forge;
2. Soudage et brasage au gaz (chalumeau);
3. Soudage aluminothermique.

Energie électrique :

1. Soudage à l'arc électrique;
2. Soudage et brasage par résistance;
3. Soudage et brasage par induction.

Energie électrique et chimique :

Soudage à l'hydrogène atomique.

Fig. 3
Le soudage au feu de forge est connu depuis l'antiquité.
Même les peuplades primitives l'emploient.
Forgeron dans un village de l'Uele (Congo).

PROCÉDÉS UTILISANT LA TRANSFORMATION D'UNE ÉNERGIE CHIMIQUE EN ÉNERGIE CALORIFIQUE

Les calories sont engendrées par une réaction chimique exothermique entre corps gazeux ou solides.

Dans ce cas, les pièces à souder sont chauffées par exposition à une source extérieure (flamme, four, etc.).

LE SOUDAGE AU FEU DE FORGE

C'est un procédé de soudage par pression pour lequel les calories nécessaires pour porter les pièces à assembler à la température de forgeage, s'obtiennent par un feu de forge (combustion de charbon).

Après chauffage, le soudage se réalise par application d'une pression mécanique (coups de marteau, presse, rouleau).

LE SOUDAGE AU GAZ - LE BRASAGE AU GAZ

La source de chaleur employée dans ce cas, provient de la combustion d'un gaz. Le chauffage des pièces à souder se fait au moyen d'une flamme dirigée sur elles par un chalumeau, qui assure en même temps le mélange correct du carburant et du comburant.

Ce procédé s'applique le plus généralement au soudage par fusion, qu'il soit hétérogène ou autogène. Il est cependant également utilisé pour le soudage par pression.

Dans ce dernier cas, les pièces sont portées à la température de forgeage, puis les extrémités sont forgées par un moyen mécanique.

Les combustibles les plus communément employés sont l'hydrogène (soudures tendres), l'acétylène (brasures et soudures par fusion), et récemment, le propane ou le butane (pour des raisons économiques). Le comburant est l'oxygène.

LE SOUDAGE ALUMINOTHERMIQUE

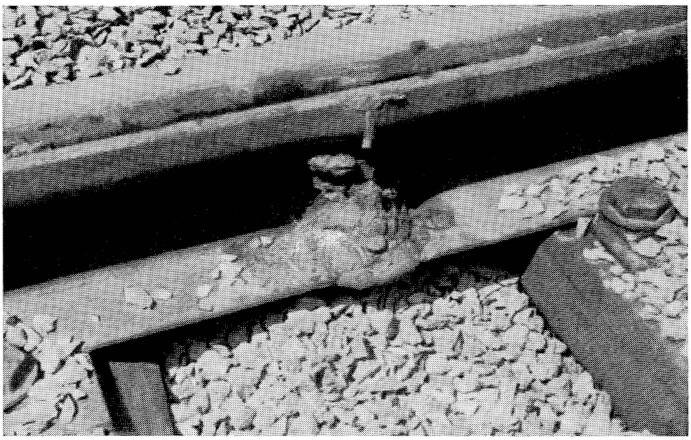


Fig. 4
Soudure aluminothermique d'un rail.

Dans ce procédé de soudage, les calories nécessaires proviennent de l'énergie thermique dégagée par la réduction d'oxyde de fer par l'aluminium.

Si un point d'un mélange convenable d'oxyde de fer et d'aluminium est porté à une température voisine de 1 200 °C, la réduction de l'oxyde de fer s'amorce et se poursuit de proche en proche.

La température théorique atteinte est de l'ordre de 3 000 °C. L'équation de la réaction est la suivante :

$$Fe_2O_3 + 2\ Al = Al_2O_3 + 2\ Fe.$$

L'incendie du mélange se provoque généralement par une cartouche de magnésium.

Ce procédé peut se réaliser avec ou sans application de pression. Dans le premier cas, le métal liquide provenant de la réaction n'est pas utilisé comme métal d'apport.

L'application presque unique de ce procédé se rencontre dans le soudage de rails de tramways et parfois de rails de chemin de fer (voir figure 4). Les deux extrémités des rails à abouter sont placées dans un creuset contenant le mélange d'oxyde de fer et d'aluminium.

PROCÉDÉS UTILISANT LA TRANSFORMATION D'UNE ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN ÉNERGIE CALORIFIQUE

Cette transformation peut s'obtenir soit par effet Joule, soit par arc électrique (en somme, effet Joule dans un conducteur gazeux).

L'effet Joule est mis à profit dans les procédés de soudage et de brasage par résistance et dans les procédés de soudage et brasage par induction.

L'arc électrique s'emploie dans les procédés de soudage par fusion.

LE SOUDAGE A L'ARC ÉLECTRIQUE

Le soudage électrique à l'arc est le procédé de soudage autogène par fusion, dans lequel l'arc électrique est utilisé comme source calorifique, pour provoquer la fusion simultanée des bords à souder et, le cas échéant, d'un métal d'apport.

Cette méthode générale de soudage comprend elle-même plusieurs systèmes se différenciant par le mode d'utilisation de l'arc, le mode opératoire, l'atmosphère dans laquelle le soudage s'effectue et la nature du courant électrique. L'arc électrique est une des formes du passage du courant électrique à travers les gaz. Il provoque des phénomènes lumineux et calorifiques.

La décharge électrique dans un milieu gazeux n'est possible que grâce à l'ionisation de ce milieu, ionisation qui se réalise à des températures élevées ou par chocs.

Les ions libres formés sont orientés par le champ électrique.

Dans ces seules conditions, il est cependant nécessaire de disposer d'une différence de potentiel très élevée pour obtenir un courant important.

Heureusement, l'effet thermo-ionique, par ses propriétés spéciales, modifie complètement les conditions du milieu gazeux et rend possible l'existence du soudage à l'arc.

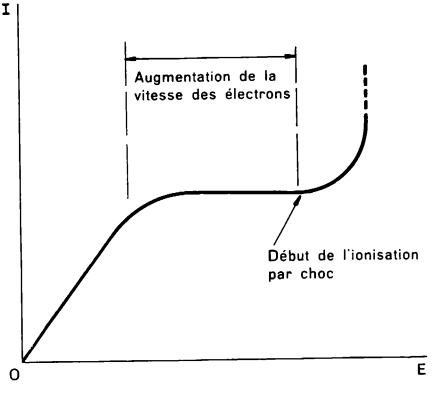


Fig. 5
Courbe I-E dans un gaz ionisé au préalable.

Par effet thermo-ionique, il faut entendre la propriété que possèdent certains corps d'émettre des électrons dans des conditions déterminées.

Pour les métaux, l'émission d'électrons n'est intense qu'aux températures élevées. Pour certains oxydes de métaux, alcalins et alcalino-terreux, l'émission électronique a lieu à basse température.

Les électrons émis par une cathode incandescente rencontrent des atomes gazeux. Le choc résultant d'une vitesse suffisante aura pour effet d'expulser des électrons de l'atome rencontré, qui deviennent des ions positifs attirés par la cathode, et qui, par leurs chocs sur celle-ci, la maintiennent à haute température.

Le maintien à haute température nécessaire pour l'émission thermo-ionique est déterminé par le grand nombre d'ions positifs qui viennent frapper

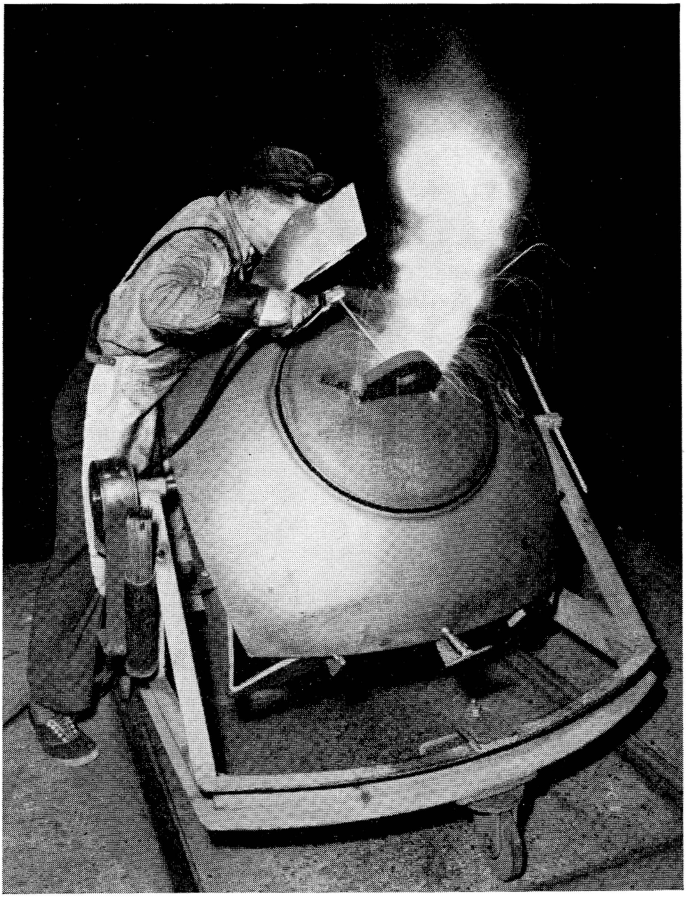


Fig. 6
Soudage à l'arc.

la cathode, d'où nécessité d'une certaine pression du milieu gazeux et d'une intensité de courant minimum. Les électrons de choc et les électrons libérés sont attirés par l'anode.

En résumé, l'existence d'une décharge par arc est rendue possible :

— par une tension d'alimentation suffisante pour donner aux électrons une vitesse permettant l'ionisation par choc;
— par une pression minimum du milieu gazeux;
— par l'incandescence permanente de la cathode, source d'émission des électrons.

Pour amorcer l'arc, il faut créer la tache cathodique incandescente. Pour cela, l'anode et la cathode sont mises en contact. Il se produit alors au contact un échauffement par effet Joule.

L'incandescence une fois réalisée, l'arc peut s'amorcer si les conditions électriques d'intensité et de tension sont remplies. L'arc se maintient d'après le processus indiqué ci-dessus.

Le soudage à l'arc est possible :

1. par arc jaillissant entre deux électrodes en charbon, soit avec courant continu, soit avec courant alternatif;
2. par arc jaillissant entre la pièce à souder et une électrode en charbon et emploi du courant continu;
3. par arc jaillissant entre la pièce à souder et une électrode en métal consommable ou non, soit avec courant continu, soit avec courant alternatif.

Les deux premiers procédés ne sont plus employés. Ils le furent lors des premières applications du soudage à l'arc. Le second était encore en usage il y a quelques années pour la réparation de pièces de fonderies. La mise au point d'électrodes enrobées pour le soudage de la fonte a mis fin à l'emploi de cette méthode. Le troisième procédé reste le plus appliqué. Nous étudierons ci-après ses principales variantes.

Le soudage à l'arc électrique avec électrode métallique nue.

Ce procédé a presque complètement disparu. En courant continu, le procédé est plus praticable qu'en courant alternatif, car, dans ce dernier cas, métal et électrode deviennent alternativement anode et cathode à des intervalles de temps dépendant de la fréquence du courant d'alimentation.

Contrairement à l'arc avec électrode en charbon, l'arc ne peut ni s'amorcer, ni fonctionner d'une manière stable en courant alternatif, aux fréquences habituelles de l'ordre de 50 périodes/seconde. Ce phénomène est dû en particulier à la bonne conductibilité thermique du métal. Il rend impossible le maintien de la cathode à haute température, ce qui par conséquent, ne permet pas l'émission d'un nombre suffisant d'électrons.

L'amorçage et les réamorçages ne sont possibles que par des procédés d'ionisation annexes (par exemple : étincelle à haute fréquence jaillissant à chaque alternance) peu utilisés.

Le fait que l'air ambiant influence fortement le dépôt, fait que le soudage à l'arc avec électrode métallique nue n'est pratiquement plus employé.

L'*enrobage* des électrodes a donné une solution très heureuse à ce dernier problème ainsi qu'au problème de l'ionisation.

Le soudage électrique à l'arc avec électrode métallique enrobée.

L'enrobage des électrodes consiste à entourer la partie métallique (toujours de même nature que les métaux à assembler) d'une gaine composée d'oxydes, carbonates, silicates, etc.

Cet enrobage est caractérisé par une émission thermoionique beaucoup plus intense que celle des métaux et qui, de plus, se produit à une température relativement basse.

Grâce aux produits de cet enrobage, l'amorçage de l'arc devient aisé et sa stablisation très bonne aux fréquences et tensions usuelles en courant alternatif.

Les résultats sont toujours supérieurs à ceux obtenus par l'emploi d'électrodes métalliques nues.

Le soudage à l'arc avec électrodes enrobées est une suite de phénomènes complexes.

Aux deux points d'impact, c'est-à-dire sur les pièces à souder et sur l'électrode, il y a fusion du métal.

Le métal de l'électrode se transporte au fur et à mesure de sa fusion dans le cratère formé sur les pièces. Ce transport de métal a lieu sous forme de gouttes.

Les divers produits entrant dans un enrobage n'ont pas seulement un rôle électrique consistant à provoquer la thermo-ionisation. Ils ont également un rôle métallurgique : ils protègent le métal fondu de l'air ambiant par le dégagement d'une atmosphère gazeuse, et par la formation d'un laitier qui recouvre le bain de fusion et les gouttes pendant leur passage de l'électrode au bain.

En outre, la formation d'un cratère à l'extrémité de l'électrode protège la goutte pendant une partie de son parcours, l'enrobage fondant moins vite que l'âme métallique.

Ces produits apportent enfin au métal déposé, des constituants chimiques améliorants, destinés à supprimer les porosités et à conférer au métal de bonnes caractéristiques mécaniques.

Le soudage à l'arc électrique sous flux.

C'est un procédé de soudage autogène par fusion simultanée des bords des pièces à assembler et de l'extrémité d'un fil électrode qui, animé d'un mouvement d'avance continu, fournit l'apport de métal, une poudre spéciale ou flux électro-conducteur étant déposée en excès sur le joint et le recouvrant complètement.

Le dégagement de chaleur qui provoque la fusion localisée se produit dans un laitier provenant de la fusion préalable d'une petite quantité de flux.

En raison de ses propriétés électro-conductrices à la température de fusion, ce laitier est le siège d'un dégagement d'énergie calorifique important.

On admet que le bain de fusion résulte d'un apport de chaleur, donné par la combinaison d'un effet Joule et d'un effet d'arc électrique.

Ce procédé diffère encore du soudage à l'arc ordinaire, en ce sens qu'il s'effectue sans aucune des manifestations habituelles : lumière éblouissante, bruits, etc.

Il permet des vitesses de soudage élevées avec des pénétrations profondes et des déformations faibles.

Les propriétés électriques du laitier jouent un rôle prépondérant puisqu'elles déterminent l'apport de chaleur et sa répartition.

Les propriétés physiques et chimiques du laitier exercent une influence importante. Le laitier protège entièrement le bain de fusion du contact de l'air ambiant et apporte les éléments nécessaires à l'épuration du bain.

La poudre elle-même, disposée en excès, isole thermiquement la zone de soudage.

Soudage à l'arc électrique en atmosphère inerte.

Le soudage en atmosphère inerte est un mode de soudage autogène par fusion, dans lequel les calories nécessaires à la fusion proviennent d'un arc électrique. La protection du bain en fusion est assurée par un gaz inerte. L'arc électrique jaillit entre l'extrémité d'une électrode réfractaire ou fusible et les bords des pièces à assembler. Un gaz inerte est canalisé vers l'électrode et les zones de soudage, afin d'isoler l'arc et le métal fondu de l'atmosphère extérieure, qui a comme on le sait, une influence néfaste sur la stabilité de l'arc et les propriétés du métal déposé.

Ce procédé est appliqué avec succès pour l'assemblage de nombreux métaux et alliages : alliages légers, nickel et ses alliages, etc.

Le gaz inerte employé est l'argon ou l'hélium, et le CO_2 pour le soudage des aciers.

Le choix de l'alimentation électrique dépend du type d'électrode utilisé (fusible ou réfractaire) et des métaux ou alliages à souder.

L'alimentation en courant continu se fait par groupe classique ou redresseur.

L'alimentation en courant alternatif doit se faire par transformateurs de soudage spéciaux.

Les appareils de soudage à électrode fusible utilisent toujours le courant continu (procédé connu aussi sous le nom de « MIG » : metal-inert-gas).

Les électrodes réfractaires sont généralement constituées par du tungstène pur ou du tungstène thorié. Cet alliage se caractérise par une meilleure facilité d'amorçage de l'arc, due au pouvoir émissif du thorium. Le procédé est connu sous le nom de TIG-welding (Tungsten-inert-gas).

Les métaux d'apport utilisés sont de nature identique à celle des matériaux à assembler.

Soudage électrique de goujons au pistolet.

Il existe plusieurs procédés. Certains, très simples, ne demandent pas la préparation des extrémités des goujons. Leurs champs d'applications sont naturellement limités.

Fig. 7
Soudage de goujons
au pistolet.

Les phases suivantes se succèdent automatiquement :

— Le goujon est mis en contact avec la tôle afin d'amorcer l'arc.
— L'arc s'établit entre le goujon et la tôle. Le goujon s'écarte alors légèrement de la tôle afin de maintenir l'arc amorcé. L'extrémité du goujon et une zone de la tôle sont portées à la fusion.
— Le goujon plonge dans le bain de fusion et le courant est coupé. On obtient ainsi la jonction du métal du goujon et de celui de la tôle.

L'équipement nécessaire consiste en un pistolet approprié, un contrôleur de temps et une source de courant.

Le pistolet sert à positionner le goujon et à lui imprimer les mouvements requis. Le fait de pousser sur la gâchette du pistolet enclenche le courant de soudage. Le contrôleur de temps commence à compter le temps de soudage nécessaire à la fusion de l'extrémité du goujon.

La durée de l'arc doit être courte afin d'éviter que le métal du goujon ne fonde d'une manière excessive.

Le courant est coupé automatiquement après le temps de soudage. Les extrémités des goujons à souder sont préparées spécialement pour faciliter l'amorçage de l'arc et sa stabilisation.

Pour l'obtention de résultats constants, il est indispensable d'utiliser des bagues spéciales de céramique que l'on place autour du goujon.

Leur rôle est le suivant :

— concentrer la chaleur de l'arc dans la zone à souder;
— éviter au maximum l'arrivée de l'air dans l'arc;
— mouler un bourrelet à la base du goujon en retenant le métal fondu dans une sorte de creuset.

LE SOUDAGE ET LE BRASAGE PAR RÉSISTANCE.

Le but du soudage par résistance est d'obtenir l'union de deux métaux sans métal d'apport.

Le procédé est basé sur l'effet Joule, c'est-à-dire sur l'énergie calorifique engendrée dans une résistance par le passage d'un courant électrique.

En soudage par résistance, ce sont les pièces à souder qui forment résistance électrique (d'où le nom de soudage par *résistance*), et c'est donc dans celles-ci que sera développée la chaleur nécessaire pour l'obtention d'une fusion locale, et donc, pour l'obtention d'une soudure.

L'objet principal de ce traité est précisément l'étude détaillée de ce procédé de soudage, sur lequel nous ne nous étendrons donc pas davantage dans cet avant-propos.

Nous ne ferons qu'exposer très brièvement en quoi consiste le soudage par résistance.

On distingue trois formes différentes dans l'application du principe (voir fig. 8) :

Le soudage par points (voir fig. 9).

Le courant est amené et son passage localisé par deux électrodes. Son temps de passage est réglé par un appareil compteur de temps. Une quantité de matière est fondue, alors que les électrodes transmettent l'effort de forgeage nécessaire à l'obtention d'une bonne soudure.

Mentionnons un procédé dérivé du soudage par points et qui est le soudage par bossages.

La localisation du passage du courant de soudage s'obtient en pratiquant des bossages dans les pièces à assembler. Cette méthode s'applique avec succès au soudage des pièces embouties dans lesquelles on réalise aisément les bossages lors d'une des opérations d'emboutissage.

Les machines à souder employées sont similaires aux soudeuses par points et portent le nom de presses à souder.

Le soudage au galet (voir fig. 10).

Appelé aussi soudage à la molette. La seule différence existant entre ce mode et le précédent se situe dans la forme des électrodes qui sont ici des galets ou molettes, auxquels on imprime un mouvement de rotation. Une particularité est à signaler : une soudure étanche au galet est constituée par une série de points de soudure, qui se superposent, et qui sont obtenus grâce à l'interruption périodique du courant de soudage.

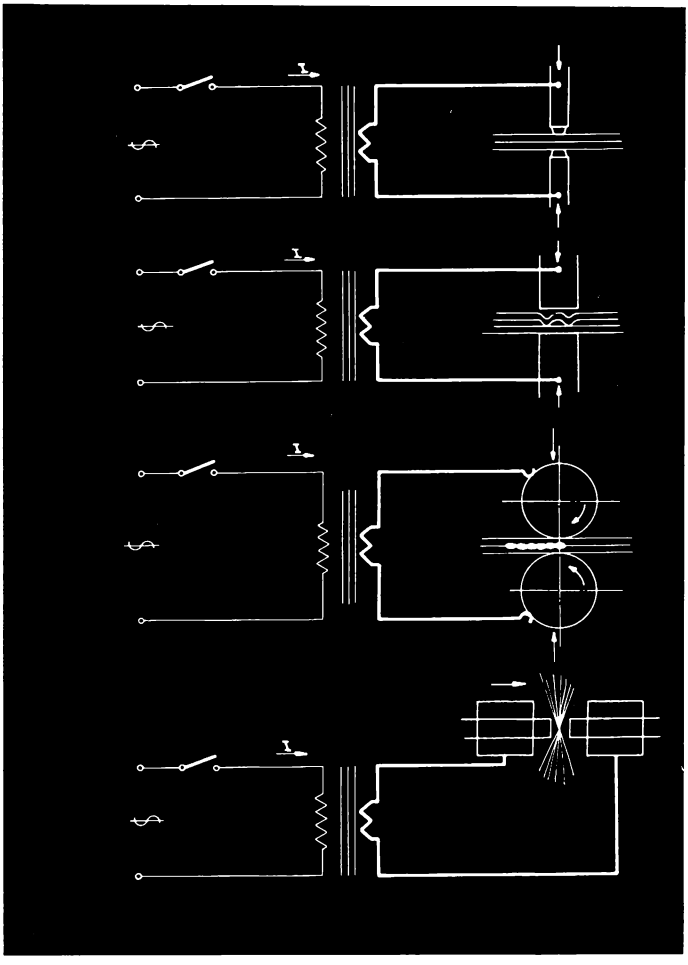


Fig. 8

Schémas de principe du soudage électrique par résistance :

a) par points,
b) par bossages,
c) au galet,
d) bout à bout.

Le soudage en bout (voir fig. 11).

On distingue ici deux méthodes : le soudage par résistance pure et le soudage par étincelage. Cette dernière est la plus employée. Elle consiste à rapprocher très lentement deux pièces sous tension.

A un certain moment, un arc électrique jaillit entre elles; il s'accompagne de la combustion d'une quantité de matière. Lorsqu'une certaine partie a été brûlée, les pièces ont atteint la température adéquate et, à ce moment, on les applique rapidement et avec force l'une contre l'autre, réalisant ainsi le forgeage. Le courant de soudage est coupé lors du forgeage.

Le brasage par résistance.

Quant au brasage par résistance, c'est un procédé dans lequel la chaleur requise pour porter les surfaces à braser à la température voulue, est produite par effet Joule. Le chauffage peut être direct ou indirect, selon que la chaleur provienne du passage du courant dans les pièces mêmes ou que la chaleur soit transmise aux pièces par des électrodes en matériau résistant, parcourues par le courant de chauffage.

LE SOUDAGE ET LE BRASAGE PAR INDUCTION

Ces deux procédés tendent à se développer. La source de chaleur utilisée est l'effet Joule produit par les courants de Foucault, induits par un champ magnétique alternatif dans lequel on place les pièces à souder ou à braser. Pour que ce chauffage soit efficace, on utilise des hautes fréquences. C'est pourquoi ce procédé s'appelle parfois soudage ou brasage par haute fréquence.

L'emploi de ce système est limité par le prix élevé des installations, quoiqu'il apporte parfois une solution aux problèmes difficilement résolus par les autres procédés.

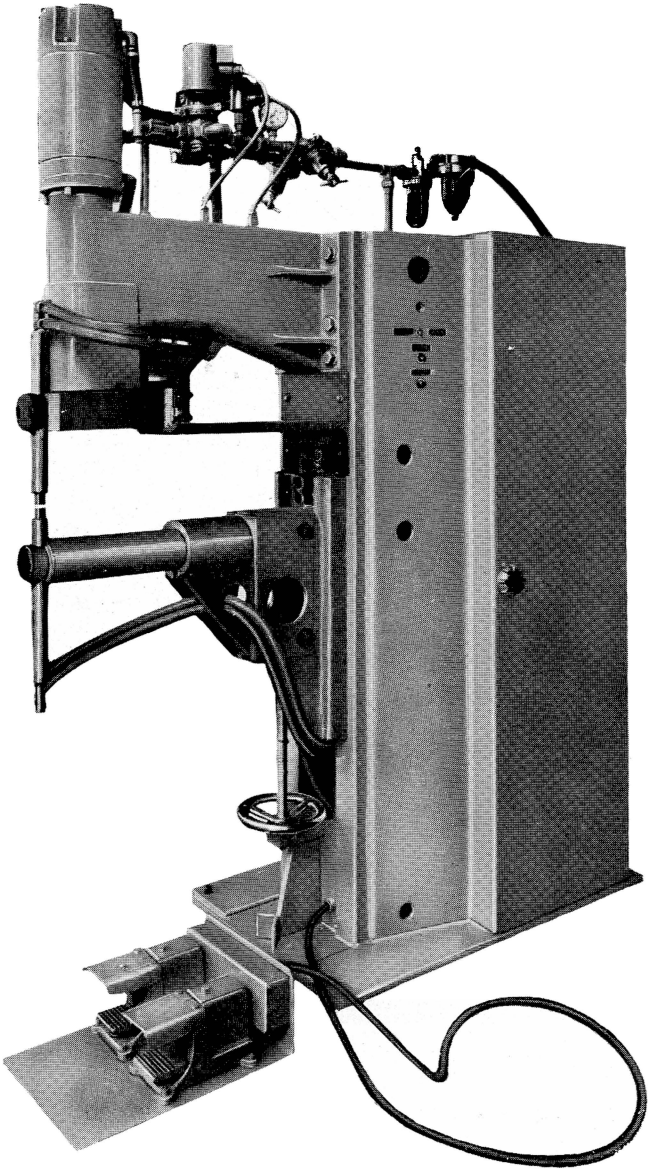


Fig. 9
Machine à souder par points.

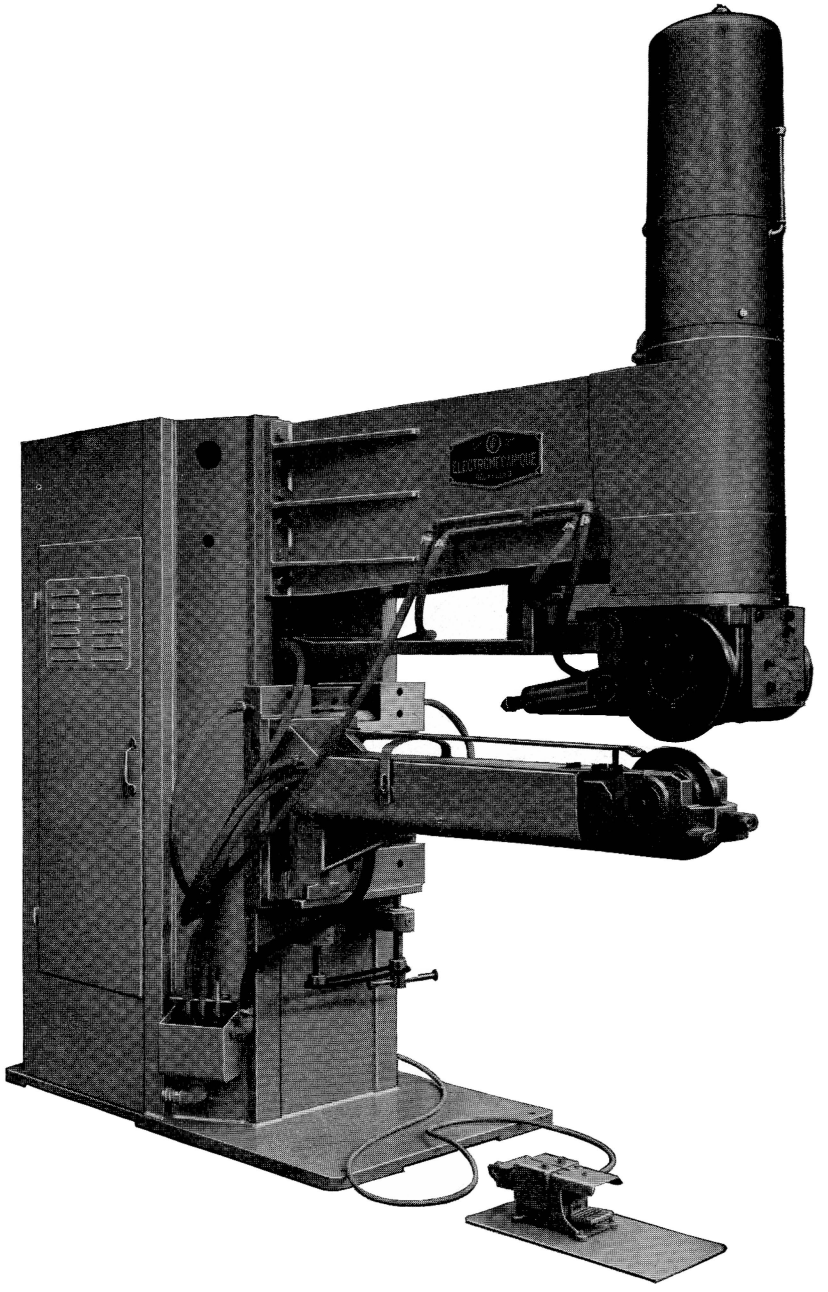


Fig. 10
Machine à souder au galet.

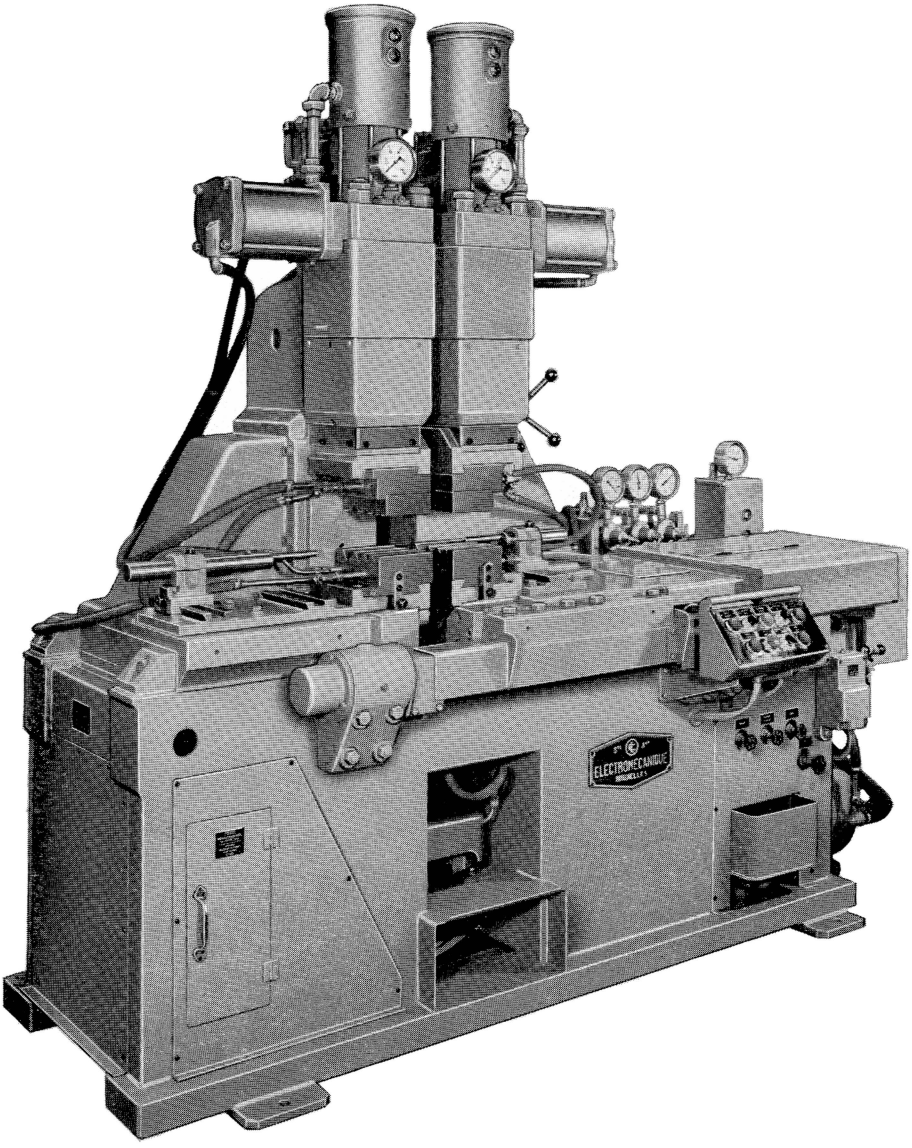


Fig. 11
Machine à souder en bout.

PROCÉDÉ UTILISANT L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET CHIMIQUE

Le soudage à l'hydrogène atomique.

Le soudage à l'hydrogène atomique est un procédé de soudage à l'arc.

L'hydrogène atomique est obtenu par dissociation à très haute température de l'hydrogène moléculaire. Cette dissociation est réalisée en dirigeant un courant d'hydrogène sur un arc électrique jaillissant entre deux électrodes en tungstène. Cet arc fournit l'énergie nécessaire à la dissociation. Les atomes d'hydrogène se recombinent au contact des pièces à souder pour former des molécules d'hydrogène et cette réaction, inverse de la première, se fait avec un dégagement important de calories qui servent à porter les pièces à souder à la température de fusion. Ce procédé se réalise avec ou sans métal d'apport.

AUTRES PROCÉDÉS

Pour terminer cette revue des différents modes de soudage des métaux, il convient de dire également quelques mots d'un procédé qui ne demande aucune source de chaleur. Il s'agit notamment du soudage à froid, qui, le nom l'indique, se pratique à la température ambiante.

Deux pièces parfaitement polies adhèrent entre elles. On a pu constater que l'effort nécessaire pour les séparer était supérieur à l'effort exercé sur les pièces par la pression atmosphérique. On conclut donc à une certaine adhérence moléculaire du fait qu'un grand nombre de molécules se trouvent très rapprochées les unes des autres. Il y a attraction intermoléculaire. On peut favoriser cette attraction naturelle par l'application de pressions adéquates. Plusieurs métaux peuvent ainsi être soudés.

Industriellement, cette méthode ne s'applique jusqu'à présent qu'au soudage de l'aluminium et du cuivre dans des cas particuliers.

Il va de soi que des traitements spéciaux doivent être, au préalable, appliqués aux pièces à unir.

Mentionnons enfin des techniques récentes et promises à un avenir certain :

— **le soudage par faisceau d'électrons ;**

— **le soudage à l'arc au plasma ;**

— **le soudage par rayons lumineux** (lasers) ;

— **le soudage par ultrasons.**

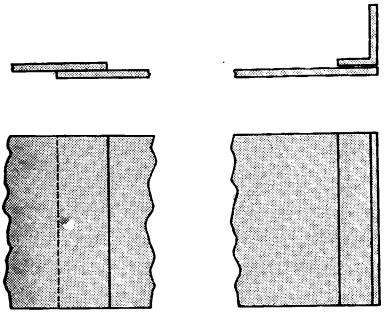


Fig. 12. — Assemblages par recouvrement

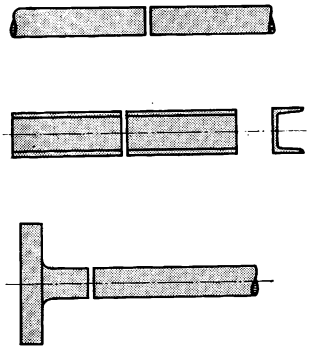


Fig. 13. — Assemblages bout à bout.

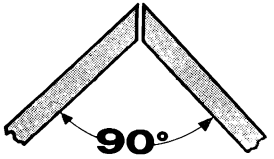


Fig. 14. — Assemblage en onglet.

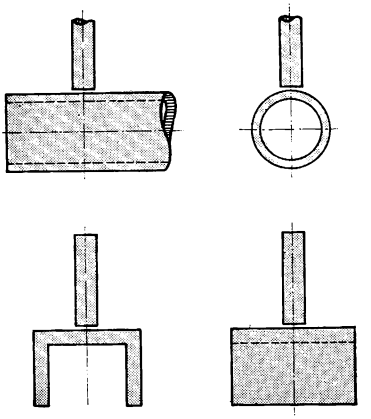


Fig. 15. — Assemblages en T.

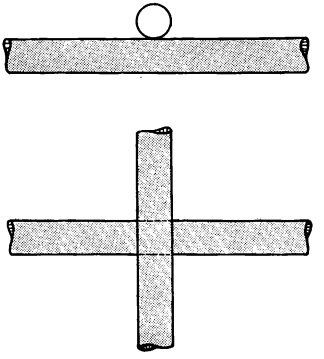


Fig. 16. — Assemblage en croix.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

Avant d'aborder l'étude détaillée des procédés de soudage par résistance, il est utile de signaler brièvement leurs possibilités et leurs particularités et de familiariser le lecteur avec les différents termes techniques que l'on rencontre le plus couramment.

POSSIBILITÉS GÉNÉRALES

Les types de joints réalisables par ces procédés sont les suivants :

— Assemblages par recouvrement;
— Assemblages bout à bout;
— Assemblages en « T » et en croix.

Nous ajouterons deux possibilités connexes :

— Le chauffage direct ou indirect;
— Le refoulement.

Dans *les soudures par recouvrement*, les pièces sont superposées à l'endroit de leur assemblage (voir fig. 12).

Dans *les soudures bout à bout*, la soudure s'étend à la section entière de deux pièces placées bout à bout, suivant leur axe de symétrie. C'est le cas des soudures dites *en rectiligne* (voir fig. 13).

La soudure en bout de pièces dont les axes forment un certain angle est également possible. C'est le cas des soudures dites *en onglet* (voir fig. 14).

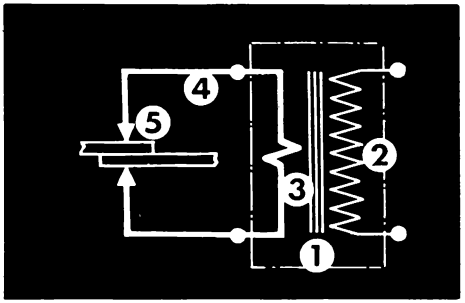
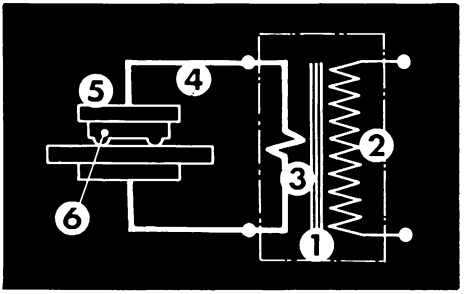
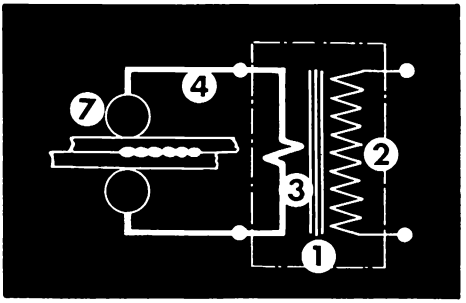
Dans *les soudures en « T »*, les pièces sont assemblées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre (voir fig. 15).

La figure 16 représente le principe *des assemblages en croix*.

PRINCIPALES TECHNIQUES DE SOUDAGE ET DE CHAUFFAGE PAR RÉSISTANCE

Le tableau ci-dessous donne une récapitulation des principales techniques de soudage et de chauffage par résistance avec leurs applications générales.

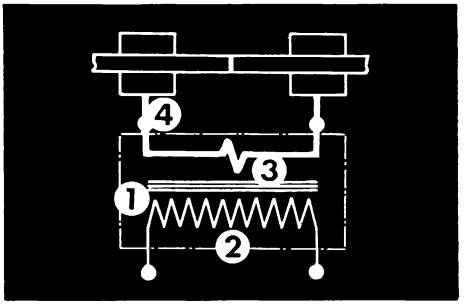
Procédés de soudage et de chauffage par résistance.

Soudage au point	
Soudage par bossages	
Soudage au galet (ou à la molette)	

Machines utilisées	Types de joints réalisés
Soudeuses au point simples Soudeuses multipoints Soudeuses-pinces	Assemblages par recouvrement
Soudeuses-presses	Assemblages : — par recouvrement — en « T » — en croix
Soudeuses au galet simples (soudeuses transversales et soudeuses longitudinales) Soudeuses multigalets Soudeuses au galet plus mandrin	Assemblages : — par recouvrement — bout à bout

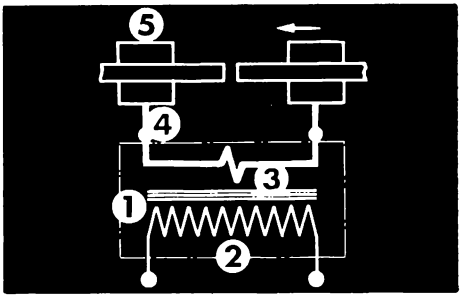
Procédés de soudage et de chauffage par résistance

Soudage en bout
— par résistance pure

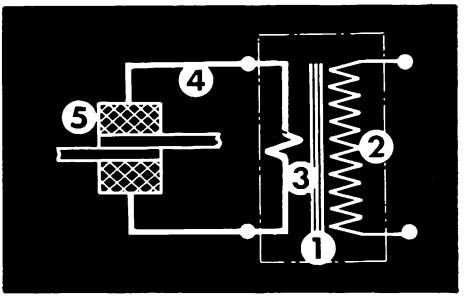


— par étincelage

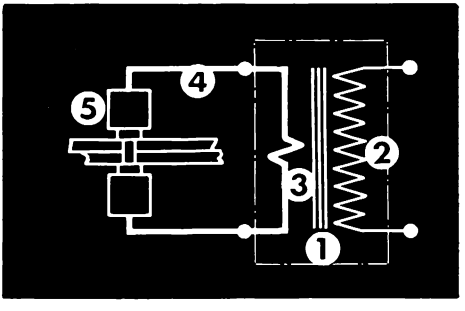
— par touches de préchauffage et étincelage



Brasage par résistance



Chauffage par résistance et refoulement



Machines utilisées	Types de joints réalisés
Soudeuses en bout : — par résistance pure — par étincelage — par étincelage avec touches de préchauffage	Assemblages : — bout à bout — en « T »
— Machines à braser par résistance — Pinces de brasage	Assemblages par recouvrement
— Machines à chauffer par résistance et à refouler	Chauffage et refoulement de pièces diverses Rivetage

Le soudage électrique par résistance est un procédé de soudage autogène, sans apport de métal, avec application de pression, et utilisant comme source calorifique, l'effet Joule d'un courant électrique traversant l'assemblage en un endroit localisé.

Une *soudure* est une union moléculaire intime entre deux pièces.

Le *soudage* est l'opération qui donne lieu à la formation d'une soudure.

Une *soudeuse* est une machine avec laquelle on pratique l'opération de soudage, en vue de l'obtention d'une soudure.

Le *transformateur de soudage* (1), qui équipe les soudeuses par résistance, est un transformateur électrique de construction spéciale, qui fournit l'énergie électrique nécessaire au soudage.

Il comporte *un circuit primaire* (2), relié au réseau d'alimentation électrique et *un circuit secondaire* (3) très particulier qui en général n'est composé que d'une spire.

Le *circuit secondaire extérieur* (4), relié au secondaire proprement dit, comprend les conducteurs électriques amenant le courant de soudage aux *électrodes* (5), qui, elles, sont directement en contact sous pression avec les pièces à souder ou à chauffer.

Le soudage par points est l'opération consistant à réaliser un assemblage par recouvrement par une union en un ou plusieurs points.

Le point de soudure est une lentille de métal fondu, puis solidifié, qui constitue l'union entre les deux pièces d'un assemblage par recouvrement.

Des soudeuses par points permettant d'exécuter simultanément plusieurs points de soudure sont appelées *soudeuses multi-points*.

Les soudeuses par points peuvent être *fixes* ou *mobiles*.

Dans ce dernier cas, elles sont appelées *pinces de soudage* à cause de leur forme spéciale.

Le soudage par bossages est dérivé du soudage par points. Dans ce procédé, des bossages ou proéminences (6) pratiquées dans l'une des pièces à souder assurent une bonne localisation du passage du courant électrique et de la pression de soudage. Les soudeuses utilisées portent le nom de *soudeuses-presses*.

Dans le procédé de *soudage au galet*, les pièces à assembler sont entraînées par des galets (électrodes) (7) en rotation qui créent dans ces pièces des points de soudure équidistants. Les points de soudure sont ainsi formés par des impulsions de courant suivies de repos.

Si les points soudés ainsi réalisés, se superposent, on obtient une soudure dite continue.

Les soudeuses au galet avec *mandrin* et les soudeuses *multi-galets* sont destinées à des applications spéciales.

Le soudage en bout, opération consistant à réaliser l'assemblage de deux pièces bout à bout, comprend trois procédés distincts :

Le soudage en bout par *résistance pure*, dans lequel les calories nécessaires sont engendrées par le passage d'un courant électrique dans les pièces à souder même dont les extrémités à assembler sont maintenues sous pression.

Le soudage en bout *par étincelage*, dans lequel les calories nécessaires sont engendrées par le passage d'un courant électrique dans les pièces à souder amenées en contact imparfait, sous très faible pression. Ce procédé est caractérisé par la projection de particules de métal en fusion durant l'opération de soudage.

Le soudage par étincelage, *avec touches de préchauffage*, très souvent utilisé pour le soudage de pièces massives et d'aciers spéciaux, est une combinaison des deux premiers procédés.

Le refoulement est une opération consistant à porter une pièce à une certaine température, puis à la soumettre à un effort de compression pour l'amener à une forme désirée. Des machines à chauffer par résistance, similaires aux soudeuses par résistance, permettent la réalisation de cette opération.

Le brasage par résistance est un procédé de brasage, dans lequel la chaleur requise pour porter les surfaces à braser à la température voulue est produite par effet Joule.

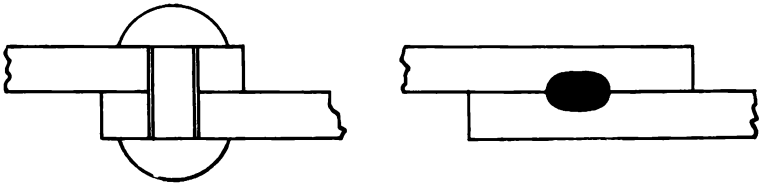


Fig. 17
A gauche : type d'assemblage par rivet
A droite : type d'assemblage par point de soudure

CHAPITRE III

LE SOUDAGE PAR POINTS

DÉFINITION

Le soudage électrique par points est un procédé de soudage autogène, sans métal d'apport, dans lequel l'effet Joule d'un courant électrique traversant durant un temps déterminé la résistance ohmique et la résistance de contact de deux pièces formant assemblage par recouvrement, est utilisé comme source calorifique, pour porter un volume de matière à la température de soudage. Le passage du courant est localisé par deux électrodes qui transmettent également un effort de compression.

BUT DU SOUDAGE PAR POINTS

Le but de ce procédé est de réaliser l'assemblage par recouvrement, à l'aide de points de soudure, d'éléments métalliques dont l'épaisseur est relativement faible par rapport à leurs autres dimensions.

Le point de soudure est constitué par une lentille de métal porté à la fusion à l'endroit du contact entre les deux tôles et réalisant après solidification un joint localisé entre celles-ci. Ce joint est parfaitement continu, de mêmes caractéristiques physiques et métallurgiques que les métaux de base.

La lentille a comme plan de symétrie le plan de séparation des deux pièces.

Le soudage par points remplace généralement le rivetage, l'assemblage par vis ou boulons et écrous (voir fig. 17). Les avantages de ce procédé, notamment la très grande rapidité d'exécution, apparaîtront par la suite.

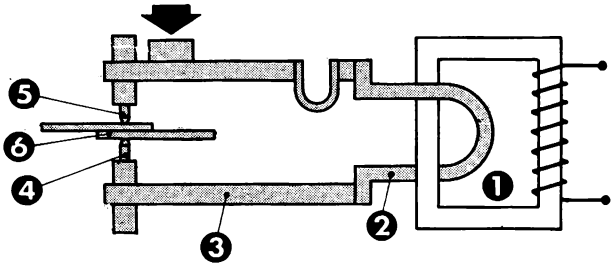


Fig. 18

Représentation schématique d'une machine à souder par points :

1) transformateur de soudage;
2) secondaire du transformateur;
3) circuit secondaire extérieur;
4) électrode inférieure;
5) électrode supérieure;
6) pièces superposées à souder.

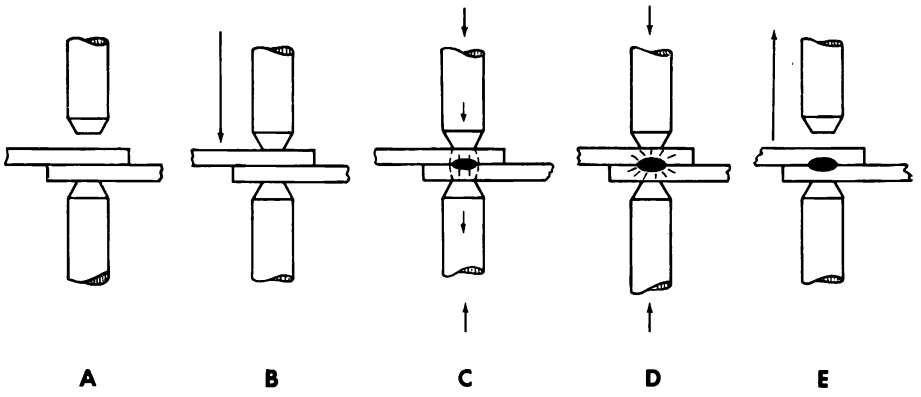


Fig. 19

Représentation schématique des différentes phases d'une opération de soudage par points :

A) Eléments à souder posés l'un sur l'autre;
B) Descente de l'électrode supérieure;
C) Passage du courant électrique de soudage;
D) Interruption du passage du courant de soudage;
E) Fin de l'application de l'effort sur le point de soudure, l'électrode supérieure remonte.

PRINCIPE GÉNÉRAL DU SOUDAGE PAR POINTS

(voir fig. 18 et 19)

Au lieu d'être empruntée à un foyer chauffant extérieur, la chaleur est engendrée dans les pièces mêmes, par effet Joule, à l'endroit du joint à réaliser.

Les parties des éléments à souder (à l'endroit du recouvrement) sont posées l'une sur l'autre sur l'électrode inférieure.

On provoque la descente de l'électrode supérieure qui accoste l'assemblage. Celui-ci se trouve ainsi soumis à une certaine pression entre les deux électrodes.

Les côtés extérieurs des tôles sont en contact avec les électrodes sur une surface délimitée par leurs pointes. Ces électrodes en contact sous pression avec les pièces à souder, sont reliées aux bornes du secondaire d'un transformateur électrique dont le rôle est de fournir dans le circuit secondaire un courant électrique d'intensité élevée sous une faible tension.

Le circuit secondaire étant ainsi fermé par les pièces à souder, on provoque le passage d'un courant électrique à travers ce circuit pendant un temps déterminé.

Comme nous l'apprend l'électrotechnique, le dégagement de chaleur par effet Joule ($Q = kRI^2t$) en chacun des points du circuit sera proportionnel à la résistance ohmique en chacun des points.

Il se fait que la résistance propre des deux petites portions de tôle comprise entre les électrodes, et leur résistance de contact, sont très élevées par rapport aux autres parties du circuit. Ces portions de tôle seront le siège d'un dégagement calorifique intense.

Un noyau de section plus ou moins elliptique, appartenant aux deux pièces, entre en fusion à l'endroit de leur contact.

Le courant électrique circulant dans le circuit secondaire est interrompu, tandis que l'effort de compression est toujours appliqué sur les pièces par l'intermédiaire des électrodes. Le noyau fondu appelé point de soudure se solidifie sous pression.

L'électrode supérieure remonte. C'est la fin de l'opération.

On voit déjà que les facteurs importants suivants seront à considérer :

— les métaux à souder : leurs caractéristiques, leurs dimensions;
— l'intensité du courant de soudage;
— le temps de soudage;
— l'effort de compression appliqué sur le point à souder par les électrodes.

THÉORIE DU SOUDAGE PAR POINTS

PRINCIPES FONDAMENTAUX

(voir fig. 20)

Soit deux tôles T1 et T2 superposées et serrées entre deux électrodes raccordées électriquement au secondaire d'un transformateur. Un effort de compression est appliqué aux électrodes.

Provoquons le passage d'un courant électrique dans le circuit secondaire constitué par les pièces de raccordement au secondaire du transformateur, par les électrodes et les tôles.

En première approximation, on peut admettre que le courant électrique traverse la portion cylindrique ABCD des deux tôles, comprise entre les électrodes. Les bases de ce cylindre sont les surfaces des pointes d'électrodes. Si l'effort de compression appliqué sur les tôles par les électrodes est suffisant, l'accostage franc des tôles a lieu en-dessous des électrodes. En dehors de cette zone, le contact entre les tôles est très mauvais ou inexistant. Le courant électrique traverse donc la zone de contact entre les deux tôles entre M et N.

En pleine tôle, entre AB et MN et CD et MN, la résistance ohmique opposée au courant électrique par une épaisseur infinitésimale dl est :

$$dR = \frac{\rho}{S} dl$$

ρ = résistivité

S = section de passage du courant dans les tôles.

Le joint MN, constitué par la zone de contact des surfaces des deux tôles oppose au passage du courant une certaine résistance, même si ces tôles sont parfaitement propres et planes, et appliquées l'une contre l'autre avec un certain effort.

La résistance de ce joint, d'épaisseur excessivement faible, est peu élevée, mais elle est de loin supérieure à la résistance d'une tranche de même épaisseur prise en pleine matière des tôles dans le cylindre ABCD.

C'est sur l'existence de cette résistance ohmique élevée, concentrée au contact des deux pièces, et appelée résistance de contact, qu'est basé le soudage par résistance par points.

Les résistances de contact dépendent de plusieurs facteurs qui seront étudiés dans un prochain chapitre.

L'effet Joule se manifestera bien plus fortement au joint que dans le corps des pièces mêmes entre AB et MN, ou CD et MN.

L'énergie électrique développée au joint s'y transformera en énergie calorifique et les calories ainsi dégagées élèveront la température des pièces au voisinage immédiat du contact.

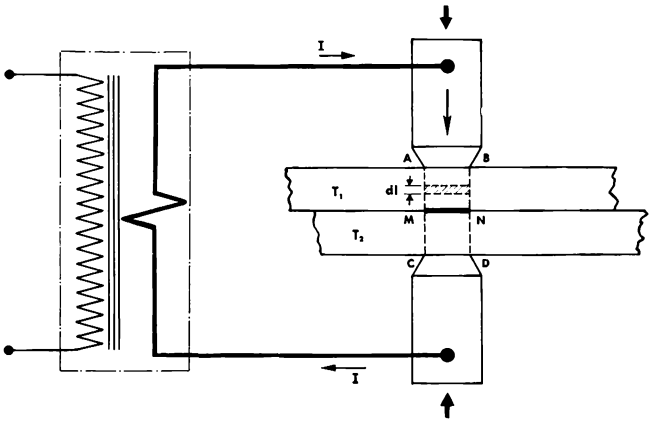


Fig. 20
Représentation schématique du soudage par points.

Par suite de cette élévation locale de la température, la chaleur va se propager par conduction dans les pièces mêmes et dans les électrodes, par rayonnement dans l'ambiance. Deux cas peuvent se produire :

Premier cas :

La quantité de chaleur produite est dispersée au fur et à mesure de sa production, dans les tôles, les électrodes, l'ambiance.

La température du joint ne s'élève pas suffisamment et se stabilise à une température inférieure à la température de soudage des métaux.

Deuxième cas :

La quantité de chaleur transmise par conduction et rayonnement est inférieure à celle dégagée au joint. La température va croître partout et notamment au joint et en son voisinage où déjà aux premiers instants de l'opération elle était la plus élevée. Elle y atteindra progressivement le point de fusion.

Si le courant électrique continue à passer, le volume de matière en fusion au voisinage du joint augmentera. Ce volume de matière en fusion, commun aux deux tôles, une fois refroidi, constitue le point de soudure.

Deux principes fondamentaux sont donc à la base du procédé de soudage par points :

1. *L'existence d'une résistance ohmique de contact élevée au joint de deux pièces métalliques*, qui y donne naissance à un dégagement calorifique intense par effet Joule ;
2. *Le procédé de chauffage par effet Joule qui doit être rapide, dynamique.*

Un temps de soudage court et une intensité de courant suffisante permettent d'atteindre rapidement la température de fusion dans la zone de contact.

Il faut donc que la chaleur dégagée par effet Joule au joint soit supérieure aux pertes de chaleur par conduction et par rayonnement.

Cette condition sera assurée en donnant au courant de soudage une valeur appropriée.

LES RÉSISTANCES DE CONTACT

Une surface métallique n'est jamais parfaitement plane, elle est rugueuse. Si elle était observée à fort grossissement, on remarquerait qu'elle est constituée de crêtes et de creux plus ou moins importants suivant son fini.

Ce relief est schématisé grossièrement à la figure 21.

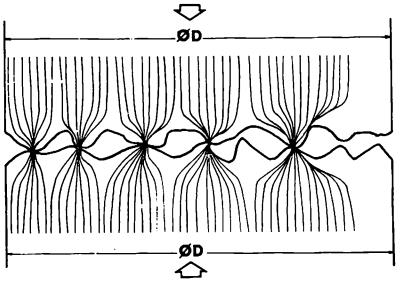


Fig. 21
Aspect de deux surfaces métalliques en contact, vu avec un très fort grossissement. Des crêtes et des creux caractérisent tout état de surface.

Cette rugosité superficielle va influencer les propriétés électriques et mécaniques du contact de deux surfaces métalliques. On peut se rendre compte que, pour une surface de contact théorique $S = \pi \frac{D^2}{4}$, la surface de contact réelle est la somme d'une grande quantité de petites surfaces de contact, inférieure à la surface supposée et théorique.

Les surfaces de contact élémentaires sont constituées par les points de contact des crêtes d'une pièce avec les crêtes de l'autre pièce.

Lors du passage du courant, les filets de courant se concentreront à l'endroit de ces points de contact. Cette contraction des filets sur une certaine longueur provoque une réduction artificielle de la section de passage.

C'est pour ces raisons que l'endroit du contact de deux pièces, même parfaitement propres, sera caractérisé par une résistance ohmique très élevée.

Des laboratoires ont entrepris des recherches dans ce domaine et effectué des mesures systématiques des résistances prenant naissance à l'endroit du contact de deux tôles à souder, sous pression entre deux électrodes, et au contact de l'électrode avec la tôle.

La résistance de contact de deux pièces métalliques, placées l'une sur l'autre, dépend :

— De la nature des métaux en contact, de leurs caractéristiques (dureté, résistance mécanique, conductivité;

— De l'état de surface des métaux caractérisé par un fini d'usinage, par un fini et un écrouissage superficiels dus au laminage, par des gaz occlus, des oxydes, calamines, impuretés diverses;

— De la pression à laquelle sont soumises les surfaces en contact et du mode d'application de cette pression (statique ou dynamique);

— De la température des métaux à l'endroit du contact.

Influence de la pression sur les résistances de contact à froid, dans les conditions rencontrées en soudage par points.

Des mesures, effectuées par les auteurs, ont porté :

— Sur des tôles en acier doux laminé à froid doublement décapé, donc des surfaces exemptes de calamine.

Epaisseur : 1 mm.

— Sur des tôles en acier inoxydable 18/8 non stabilisé.

Epaisseur : 1 mm.

Le dispositif de mesure est donné à la figure 22. Il comprend :

— Un dispositif de mise sous pression des tôles, analogue aux dispositifs à air comprimé utilisés dans les machines à souder par points;

— Deux électrodes de forme et de composition identiques à celles utilisées en soudage par points pour ces épaisseurs de tôles.

— Une batterie d'accumulateurs et les appareils de mesure : un ampèremètre et un millivoltmètre très précis.

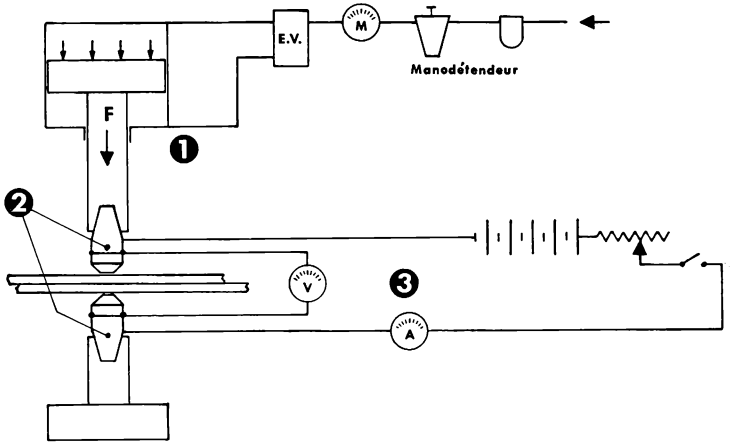


Fig. 22

Dispositif de mesure de résistances de contact de tôles dans les conditions du soudage par points.

1. Dispositif de mise sous pression des tôles — Alimentation du cylindre en air comprimé contrôlée par une électrovanne — Réglage de la pression d'air à l'aide d'un manodétendeur.
2. Electrodes.
3. Source d'énergie électrique pour les mesures.

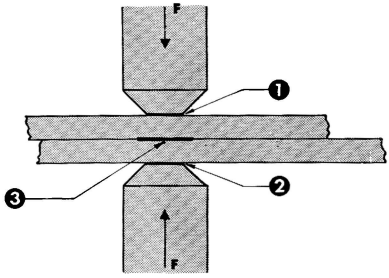


Fig. 23

Résistances ohmiques de contact. Tôles superposées placées entre deux électrodes sous pression.

1. Résistance de contact entre l'électrode supérieure et la surface extérieure d'une tôle.
2. Résistance de contact entre l'électrode inférieure et la surface extérieure de la seconde tôle.
3. Résistance au contact des faces intérieures des tôles.

Tableau A

Résistances de contact à froid entre électrode et tôle, en fonction de l'effort de compression appliqué sur la tôle par l'électrode même, en microhms (voir fig. 23).

Effort de compression en kg		200	400	600	800	1 000
Electrodes : tronconiques pointe diamètre 5 mm (fig. 24) en alliage de cuivre	*Tôle :* acier doux laminé à froid décapé épaisseur : 1 mm	94	40	20	13	7
Electrodes : à pointe sphérique rayon 75 mm (fig. 25) en alliage de cuivre		56	28	18	10	6
Electrodes : tronconiques pointe diamètre 5 mm (fig. 24) en alliage de cuivre	*Tôle :* acier inoxydable 18/8 non stabilisé épaisseur : 1 mm	141	71	41	26	14
Electrodes : à pointe sphérique rayon 75 mm (fig. 25) en alliage de cuivre		107	64	41	24	14

Les résistances de contact suivantes ont été mesurées :

— Résistances de contact entre électrodes et surface extérieure de la tôle ;

— Résistances de contact entre les deux tôles, superposées et insérées entre les électrodes supérieure et inférieure (Résistance au contact des faces intérieures des tôles - voir fig. 23).

Les deux tableaux A et B et les graphiques (fig. 26, 27 et 28), donnent les valeurs des résistances de contact mesurées en fonction de l'effort aux électrodes pour deux types d'électrodes : électrodes à pointe tronconique et électrodes à pointe sphérique, en alliage de cuivre (fig. 24 et 25). La valeur de la résistance de contact de deux pièces métalliques, insérées entre deux électrodes, diminue quand l'effort appliqué sur ces pièces par les électrodes augmente. En fait, à une augmentation de pression sur les surfaces en contact correspond un écrasement progressif des crêtes en contact et donc à une augmentation des surfaces de contact élémentaires.

Tableau B

Résistances de contact à froid entre les deux tôles en fonction de l'effort de compression appliqué sur les tôles par les électrodes.

Résistances ohmiques de contact à froid — au joint de deux tôles sous pression localisé par deux électrodes — en microhms — (voir fig. 23).

Effort de compression en kg		200	400	600	800	1000
Electrodes : tronconiques pointe diamètre 5 mm (fig. 24) en alliage de cuivre	*Tôles :* deux tôles en acier doux laminé à froid - décapé Epaisseur : 1 mm	—	196	160	118	106
Electrodes : à pointe sphérique rayon 75 mm (fig. 25) en alliage de cuivre		192	128	108	92	84
Electrodes : à pointe sphérique rayon 75 mm (fig. 25) en alliage de cuivre	*Tôles :* deux tôles en acier inoxydable 18/8 - non stabilisé Epaisseur : 1 mm	316	266	196	145	98

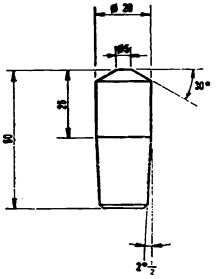


Fig. 24
Electrode à pointe tronconique.

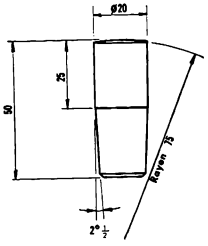


Fig. 25
Electrode à pointe sphérique.

Certains auteurs ont tenté d'établir une formule exprimant la loi de la variation de la résistance de contact à froid en fonction de l'effort de compression et donnent la formule suivante :

$$R_c = \frac{r_1}{P\alpha}$$

R_c : résistance de contact entre tôles;
r_1 : résistance de contact pour un effort de compression unitaire;
P : effort de compression entre électrodes;
α : fonction de la nature du métal et de l'état des surfaces.

Si, à une augmentation progressive de l'effort de compression appliqué sur les tôles en contact, on fait succéder une diminution progressive de cet effort, les résistances de contact ne reprennent plus leurs valeurs initiales aux mêmes efforts, mais prennent des valeurs nettement inférieures. Cette constatation confirme l'hypothèse de l'écrasement des aspérités superficielles par l'application d'une pression.

Influence de la nature des métaux en contact et des états de surface.

Comme déjà signalé, la résistance de contact est conditionnée par le nombre de points en contact.

L'état de surface dépend du mode d'élaboration des pièces, de l'usinage, des traitements possibles après usinage. Il influence fortement les résistances de contact. Même pour des tôles en acier doux laminé à froid décapé, ou en acier inoxydable 18/8, on observe que, pour une pression donnée, les résistances de contact ont des valeurs différentes d'un échantillon à l'autre d'un même métal et même entre deux points voisins d'un même échantillon.

D'un endroit à l'autre, le relief peut varier plus ou moins fortement et il y a donc une certaine hétérogénéité de la couche superficielle de la pièce métallique, d'où il résulte une résistance de contact moyenne pour un effort de compression déterminé.

La dispersion, c'est-à-dire, l'écart entre la plus grande et la plus petite valeur de résistance de contact, diminue avec l'augmentation de l'effort de compression. Ce n'est qu'à partir d'un certain effort de compression minimum que, pour un métal donné, d'épaisseur déterminée, les valeurs de résistance de contact sont suffisamment régulières. La présence d'oxyde, de calamine, rouille, etc., sur la surface des pièces métalliques, donne lieu à des résistances de contact nettement plus élevées et excessivement variables selon le genre d'oxyde, son épaisseur, etc. La nature même du matériau influence les résistances de contact par ses caractéristiques de dureté, de résistance mécanique et de conductivité électrique.

C'est ainsi que, pour un même effort de compression, les résistances de contact sont nettement plus élevées pour l'acier inoxydable que pour l'acier doux, les mesures étant réalisées sur des tôles de même épaisseur et dans les mêmes conditions (voir fig. 26).

Ces valeurs plus élevées de résistances de contact sont dues à une plus grande dureté des aspérités superficielles de l'acier inoxydable qui s'applatissent moins par le fait de la pression.

Les résistances de contact entre électrodes et tôle sont, dans les mêmes conditions, nettement inférieures aux résistances de contact entre tôles, grâce à la matière des électrodes (alliage de cuivre — bon conducteur) et grâce à une concentration de pression parfaitement établie.

Le graphique (fig. 26) fait clairement apparaître les fortes différences de valeur entre les résistances de contact tôle-tôle et les résistances de contact électrode-tôle. Ainsi, pour les tôles de 1 mm d'épaisseur, en acier inoxydable, pour un effort de 600 kg et avec électrodes bombées, la résistance de contact tôle-tôle est de 196 microhms et la résistance de contact électrode-tôle est égale à 41 microhms. Pour des tôles en acier doux de 1 mm d'épaisseur dans les mêmes conditions, la résistance de contact tôle-tôle atteint 108 microhms et la résistance de contact électrode-tôle 18 microhms.

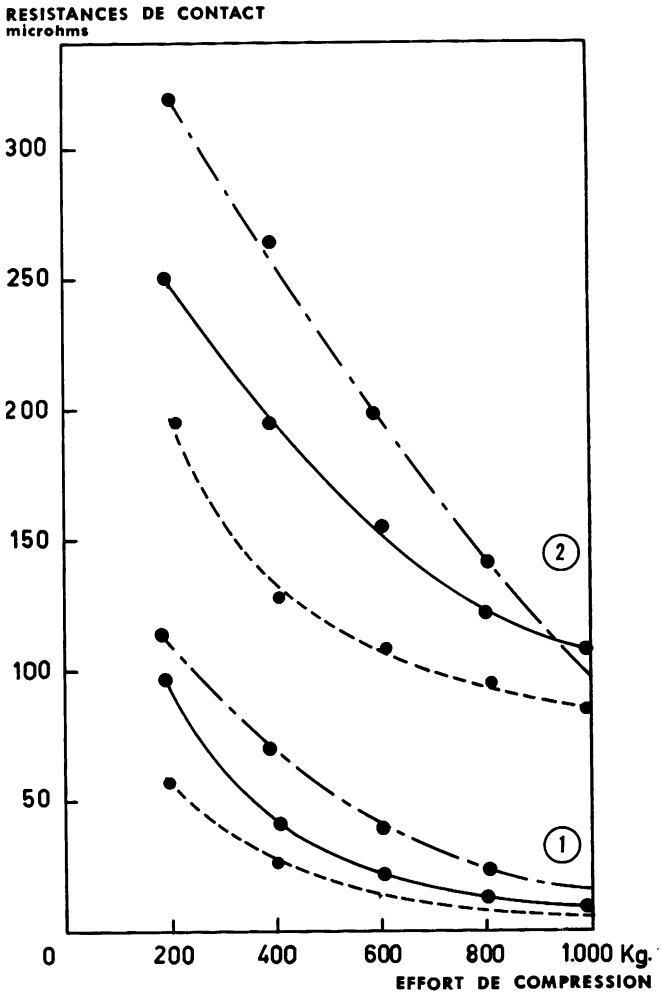


Fig. 26

Résistances de contact à froid en fonction de l'effort de compression.

1. Résistances de contact entre électrode et tôle.

2. Résistances de contact entre tôles.

——● Tôles en acier doux laminé à froid, doublement décapé. Epaisseur 1 mm. Electrodes tronconiques en alliage de cuivre.

- - - - - Tôles en acier doux laminé à froid, doublement décapé. Epaisseur 1 mm, mais avec électrodes à pointes sphériques, rayon 75, en alliage de cuivre.

— ● — Tôles en acier inoxydable 18/8 — non stabilisé — Epaisseur 1 mm. Electrodes à pointe sphérique, rayon 75, en alliage de cuivre.

Influence de la température sur les résistances de contact.

L'influence de la température sur les résistances de contact de deux métaux dépend essentiellement de la nature de ces métaux mais, généralement, et c'est le cas pour l'acier doux, un accroissement même modéré de la température entraîne une diminution très sensible des valeurs des résistances de contact (voir fig. 27).

Cette diminution de résistance est due à l'amélioration des contacts provoquée par le ramollissement des aspérités de surface sous l'effet de la température.

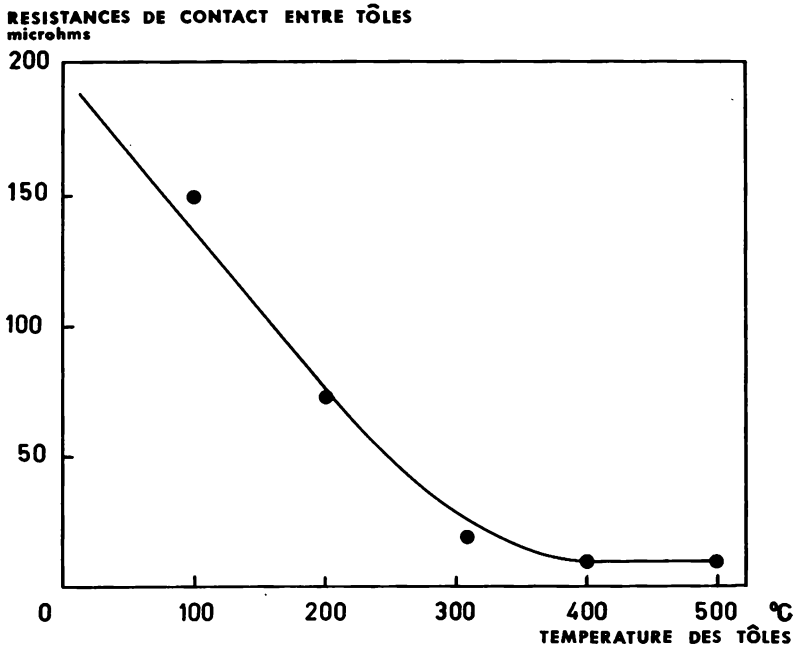


Fig. 27

Variations de la résistance de contact entre tôles en fonction de la température.

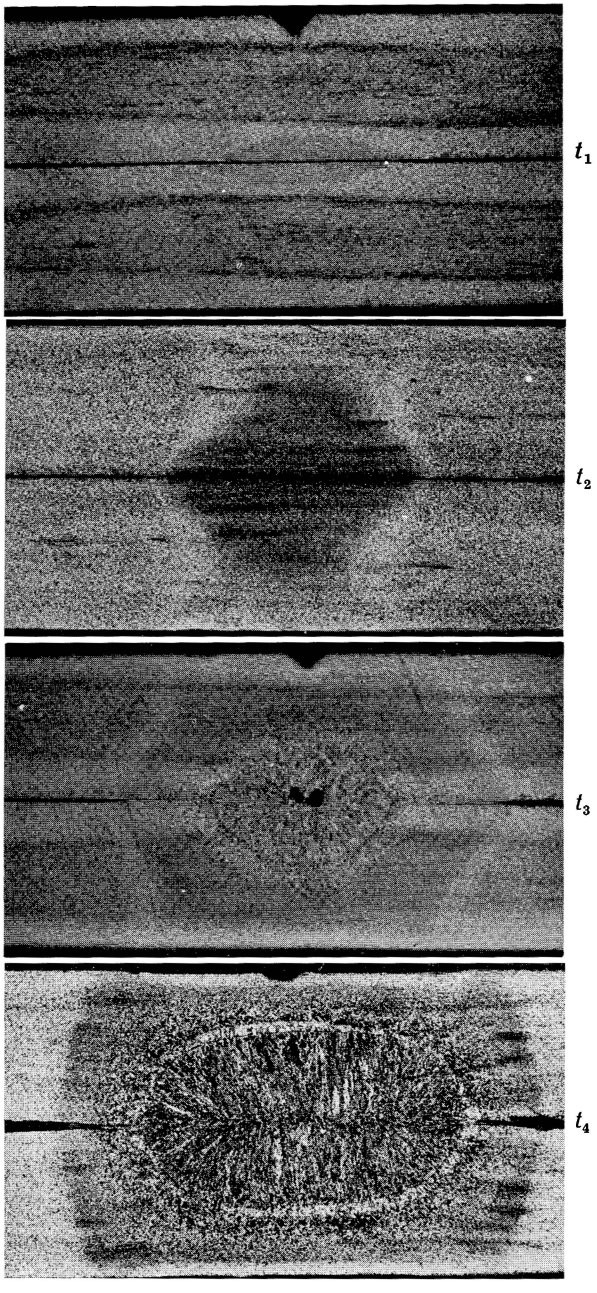


Fig. 28

Formation d'un point de soudure dans deux tôles en acier doux.
Coupes macrographiques de points réalisés avec des temps t_1, t_2, t_3 et t_4

PROCESSUS DE FORMATION DU POINT DE SOUDURE

Examen macrographique de l'évolution d'un point de soudure au cours du chauffage.

Les quatre coupes macrographiques (fig. 28) montrent d'une façon claire la naissance et le développement d'un point de soudure dans deux tôles en acier doux de 5 mm d'épaisseur.

Ces quatre points ont été exécutés sur la même machine, avec des électrodes semblables, avec le même courant de soudage et le même effort de compression entre électrodes. Le seul paramètre variable était le temps de passage du courant qui a été augmenté progressivement.

Les temps de passage du courant sont :

$$t_1 < t_2 < t_3 < t_4$$

Après le temps t_1, très court, on observe un début d'échauffement dans une zone étroite confinée au joint des tôles. Après le temps t_2, supérieur à t_1, la zone d'échauffement s'est étendue symétriquement de part et d'autre du plan du joint des deux tôles. Le chauffage a été plus intense et le volume chauffé est plus grand. Le temps t_3, supérieur à t_2, a été suffisant pour amener à la fusion un petit noyau de métal de section elliptique situé symétriquement de part et d'autre du joint des tôles. Après le temps t_4, supérieur à t_3, le volume de métal porté à la température de fusion à considérablement augmenté et un point de soudure normal assemble les deux tôles. La lentille de métal amenée à la fusion est à peu près symétrique au plan de séparation des deux pièces.

L'effet Joule, phénomène thermique de base dans la formation du point de soudure.

L'échauffement par effet Joule de la masse de métal comprise entre les électrodes et qui aboutit à la fusion d'un volume de métal situé dans la zone de contact des deux pièces est défini par la relation

$$Q = 0{,}239 \int_0^t R.I^2.\mathrm{d}t.$$

Q : quantité de calories dégagées;

I : intensité du courant de soudage qui traverse les pièces à souder (Ampères);

t : temps de passage du courant (secondes);

R = complexe de diverses résistances ohmiques rencontrées par le courant de soudage en passant d'une électrode à l'autre à travers les pièces à souder (ohms).

L'intensité du courant de soudage (I), le temps de passage du courant de soudage (t), et la résistance ohmique (R), sont les facteurs déterminants du phénomène thermique de base du soudage par points.

Il faut ajouter à ces facteurs l'effort de compression sur la soudure, facteur également important dans le processus d'échauffement.

R, intervenant dans la formule ci-dessus, est la résistance totale du circuit électrique inséré entre les électrodes.

A chaque instant, R est la somme des résistances suivantes composant le circuit (voir fig. 29) :

$$R = (R_e + R'_e) + R_c + (R_t + R'_t).$$

R_t, R'_t : Résistances propres du volume de matière des pièces à souder compris entre les électrodes. Deux portions cylindriques, ayant comme base approximativement la surface des pointes d'électrodes, et comme hauteur, l'épaisseur de chacune des tôles.

R_e, R'_e : Résistances ohmiques existant au contact des électrodes avec les tôles.

R_c : Résistance existant à la zone de contact des deux pièces.

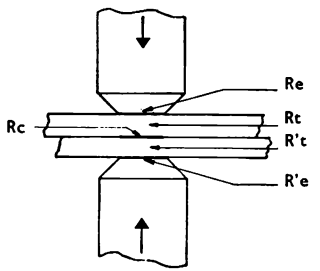


Fig. 29
Localisation des diverses résistances ohmiques entre électrodes rencontrées par le courant du soudage.

Les résistances ohmiques - Leurs rôles au cours de la naissance et du développement du point de soudure.

Ces diverses résistances ohmiques ont des valeurs initiales bien déterminées qui vont varier au cours de la formation du point de soudure.

Nous avons déjà exposé que, parmi ces résistances, la valeur de la résistance de contact entre tôles, sous pression et à la température ambiante, est de loin supérieure aux valeurs des autres résistances que doit rencontrer le courant de soudage.

Pour fixer les idées, prenons deux tôles en acier doux laminé à froid, décapé, de 1 mm d'épaisseur, placées entre deux électrodes tronconiques en alliage de cuivre et soumises de la part de celles-ci à un effort de compression de 500 kg.

Les diverses résistances ont les valeurs suivantes, immédiatement avant le passage du courant (température ambiante) :

$R_e = R'_e =$ 30 microhms

$R_c =$ 178 microhms

$R_t = R'_t =$ 7 microhms.

La figure 30 représente schématiquement la position des pièces entre électrodes et la localisation des diverses résistances avec leurs valeurs respectives, juste avant le passage du courant de soudage.

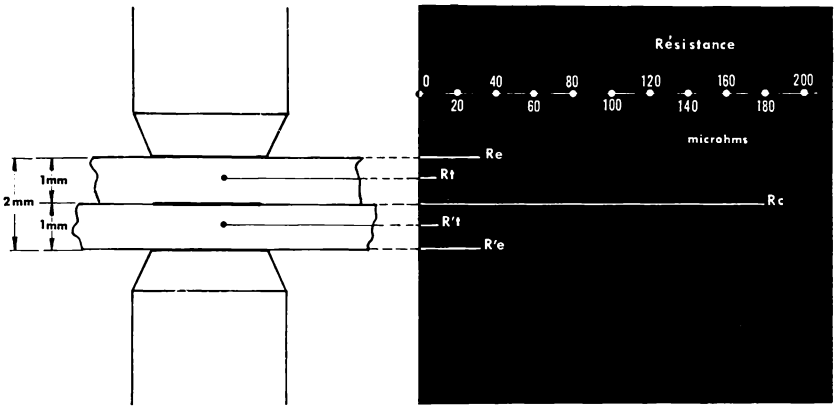


Fig. 30

Position des pièces à souder entre électrodes et localisation des diverses résistances avec leurs valeurs respectives dans le cas de deux tôles en acier doux laminé à froid — double décapage — Epaisseur 1 mm — Effort de compression : 500 kg.

Ces données montrent la valeur élevée de la résistance de contact entre tôles (R_c) à ce moment.

Pendant la période de chauffage, les résistances R_c et R_t auront chacune leur rôle bien déterminé.

La quantité de chaleur dégagée par le passage du courant électrique allant d'une électrode à l'autre est en chaque point proportionnelle à la résistance électrique de l'endroit considéré.

Par conséquent, aux premiers instants du passage du courant électrique, le dégagement de calories sera de loin le plus intense au point où se trouve R_c, c'est-à-dire au joint des tôles.

Mais, comme nous l'avons vu dans le paragraphe « Les résistances de contact », R_c étant portée à une température croissante, diminue très rapidement et tend vers zéro pour une température inférieure au point de fusion.

Cette importante chute de valeur de la résistance de contact entre tôles se ferait, d'après certains auteurs, en moins d'un quart de période.

La figure 31 représente un enregistrement oscillographique de la variation de la tension entre électrodes durant la période de passage du courant de soudage.

On peut admettre que le courant de soudage reste constant pendant toute l'opération et dans ce cas ce relevé oscillographique est une image des variations de la résistance ohmique entre les électrodes.

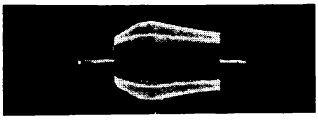


Fig. 31
Enregistrement oscillographique des variations de la tension entre électrodes pendant le passage du courant de soudage.

On observe que la résistance augmente assez rapidement pour atteindre un maximum, puis diminue progressivement jusqu'à la fin du temps de soudage.

Sur ce relevé oscillographique, on n'observe pas l'importante chute de résistance initiale qui se produit entre la température ambiante et une température bien inférieure au point de fusion. Cette chute de résistance a lieu en un temps tellement court qu'elle n'est pas enregistrée.

Le graphique des variations des résistances électriques entre électrodes pendant le soudage aurait l'allure représentée à la figure 32.

Après avoir joué son rôle décisif pendant la première phase du chauffage (temps t_i : fig. 32), la résistance de contact n'existe plus en tant que telle. A ce moment, R_t et R'_t, résistances propres des pièces, restent seules déterminantes dans l'évolution du chauffage.

En fait, R_e et R'_e, résistances de contact électrode-tôle, n'ont qu'un rôle secondaire dans la formation du point de soudure. Elles conservent une valeur faible et uniforme pendant la durée du passage du courant et ne sont le siège que d'un dégagement de chaleur peu important, grâce à la nature même des électrodes (matériau bon conducteur) et au bon refroidissement dont elles sont le siège.

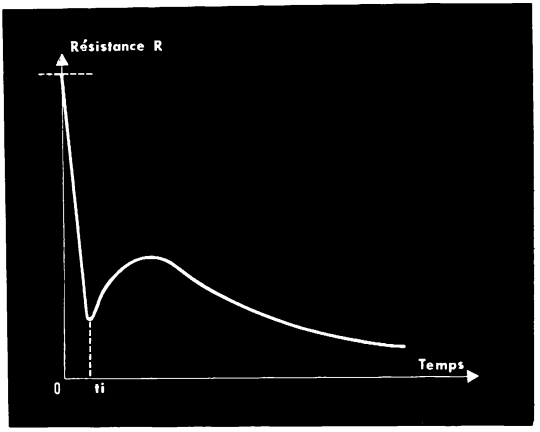


Fig. 32
Variation de la résistance entre électrodes au cours du soudage. La résistance initiale est très élevée à cause de la forte valeur de la résistance de contact entre les tôles avant le passage du courant.

L'augmentation de résistance accusée par le relevé oscillographique (fig. 31) suit en fait la chute brusque de R_c, et est due uniquement à l'augmentation de la résistance propre du métal qui croît avec la température.

Au cours de la phase finale d'échauffement, la diminution de résistance ohmique constatée sur le relevé oscillographique est provoquée par l'accroissement de la section du point de soudure. Cette augmentation du diamètre du point est mise en évidence par les macrographies de la figure 28.

Toutes ces considérations montrent que, *à chaud*, en cours de soudage, la somme des résistances ohmiques ne dépend plus que :

— de l'épaisseur des pièces à souder;
— de la résistivité propre du métal à souder;
— de la température atteinte aux divers endroits;
— du diamètre du petit cylindre de métal chauffé;
— de la section de la zone portée au point de fusion.

Les valeurs initiales des diverses résistances de deux tôles sous pression et leur évolution au cours du chauffage permettent fort heureusement la localisation de l'échauffement du métal dans le voisinage immédiat du plan du joint. C'est la valeur initiale de la résistance de contact qui déclenche le processus d'échauffement.

Sa répercussion sur l'évolution de cet échauffement est décisive bien après le temps excessivement bref pendant lequel elle existe effectivement.

En effet, pendant le temps court t_i (fig. 32) durant lequel la valeur de la résistance de contact R_c est très élevée et prédominante, l'échauffement est uniquement intense dans la zone de contact.

En conséquence, après ce temps t_i, la résistivité du volume de métal compris entre les électrodes présentera un maximum en cet endroit d'échauffement initial maximal.

Dès lors, le dégagement d'énergie calorifique restera le plus intense dans la zone de contact des tôles jusqu'à la fin du chauffage.

Au contraire, si aux premiers instants du passage du courant, l'échauffement dans la zone du contact des tôles est faible, la résistivité du volume de métal compris entre les électrodes sera la même en tous les points, au lieu de présenter un maximum au joint des pièces.

Dans ce cas, un échauffement uniforme a lieu dans toute l'épaisseur des tôles, au lieu d'être localisé là ou un point de soudure doit être formé.

L'intensité « *I* » du courant de soudage. Le temps de soudage « t ».

Par sa valeur relative, très élevée par rapport aux résistances existant aux autres points, la résistance initiale au joint des tôles permet en cet endroit un dégagement de chaleur très important *mais à condition que l'intensité I du courant secondaire soit suffisante.*

L'intensité du courant secondaire minimum sera telle que la quantité de chaleur produite au joint et dans son voisinage soit supérieure aux pertes de chaleur par conduction et rayonnement, dans les tôles, dans les électrodes, dans l'ambiance.

En dessous de cette valeur d'intensité, les calories développées se dispersent au fur et à mesure de leur production.

Un état d'équilibre est atteint et les pièces entre électrodes se stabilisent à une température inférieure au point de fusion. La valeur minimum de l'intensité du courant de soudage n'est cependant pas suffisante pour assurer la réalisation du point de soudure dans des conditions optima. En effet, avec l'intensité minimum, le temps de passage du courant est long et un volume important de métal est porté à haute température jusqu'aux pointes d'électrodes mêmes, avec tous les graves inconvénients que cela comporte au point de vue métallurgique et pratique du soudage.

Il faut donc localiser mieux l'échauffement dans le voisinage immédiat du plan du joint, diminuer le temps de passage du courant, donner à l'opération un caractère plus dynamique. On est ainsi amené à augmenter la valeur du terme $R_c I^2$ et donc augmenter l'intensité du courant secondaire.

En fait, l'intensité à donner au courant de soudage dépendra au point de vue énergétique :

— du temps de soudage (soudage lent - soudage rapide);

— de l'épaisseur des pièces à souder;

— de la nature même des matériaux à souder (résistivité, chaleur spécifique, chaleur latente de fusion);

— du diamètre du point soudé.

Au cours du temps, le point de soudure apparaît et se développe en diamètre et en hauteur.

Le diamètre augmente rapidement puis devient à peu près constant quel que soit le temps pendant lequel on prolonge le chauffage (voir fig. 33). Le mode de développement du point de soudure dépendra de l'épaisseur des tôles et le diamètre final du point soudé sera fonction du diamètre de la pointe d'électrode et de l'épaisseur des pièces à souder.

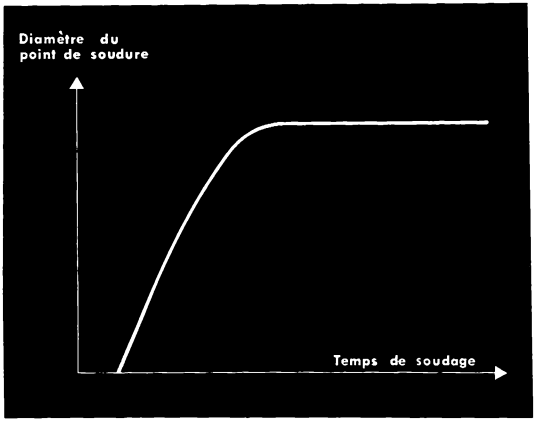


Fig. 33
Variation du diamètre du point de soudure en fonction du temps de soudage, pour une intensité déterminée.

Tous ces facteurs sont interdépendants et plus spécialement le temps de soudage sera inversement proportionnel à une certaine puissance du courant secondaire.

Ces considérations laissent entrevoir qu'il n'y a pas qu'un seul réglage pour l'obtention d'un point soudé sain et de diamètre déterminé. Les valeurs à donner à ces paramètres sont basées en grande partie sur des recherches expérimentales. Ces paramètres, intensité du courant, temps, effort de compression, seront étudiés d'une façon détaillée dans le paragraphe « L'étude des paramètres en soudage par points ».

ROLE DE L'EFFORT DE COMPRESSION DANS LA FORMATION DU POINT DE SOUDURE

L'effort de compression aux électrodes joue un rôle bien défini, dans les trois phases de l'opération de soudage : pendant le temps qui précède immédiatement le passage du courant (accostage), pendant le temps de soudage proprement dit, pendant le temps de refroidissement du point soudé, immédiatement après la période de chauffage.

Dans la formation du point de soudure, ce facteur est aussi important que l'intensité du courant, à cause de son influence prépondérante et indispensable sur la localisation de la soudure, et sur les résistances de contact.

Dans la période initiale du cycle de soudage, avant le passage du courant de chauffage, l'effort de compression appliqué sur les pièces à assembler a pour but d'amener les pièces l'une contre l'autre, afin de provoquer un contact intime entre pièces en un endroit voulu et sur une surface déterminée, c'est-à-dire, localiser la soudure.

Les parties des tôles avoisinant cette zone de contact franc ont un contact sous très faible pression ou nul et ont une résistance électrique incomparablement plus élevée.

L'effort utilisé doit être suffisamment important pour vaincre les réactions élastiques des pièces à souder et les déformer si nécessaire.

L'effort de compression doit en outre atteindre la valeur minimum qui assure :

a) une résistance de contact entre tôles suffisamment régulière et de valeur convenable;

b) une résistance de contact électrode-tôle de valeur très basse afin d'empêcher tout échauffement initial néfaste en cet endroit.

« L'étude des résistances de contact » nous a appris l'influence marquante de la pression sur ces résistances.

Pendant le temps de passage du courant au travers de l'assemblage, l'effort de compression a pour rôle de maintenir l'accostage obtenu en premier lieu, d'assurer une pression suffisante de l'électrode sur la tôle afin de maintenir la résistance électrode-tôle à une valeur très basse.

Tels sont les rôles importants que remplit l'effort de compression aux électrodes dans la formation même du point de soudure.

Mais en plus, l'effort de compression exerce une action indispensable sur les qualités mécaniques et métallurgiques du point de soudure. Elle sera étudiée dans un prochain chapitre.

C'est pour ces raisons que le soudage par points est classé dans les procédés de soudage par pression à cause précisément du rôle primordial de la pression et bien que la zone de soudure soit incontestablement portée à la température de fusion.

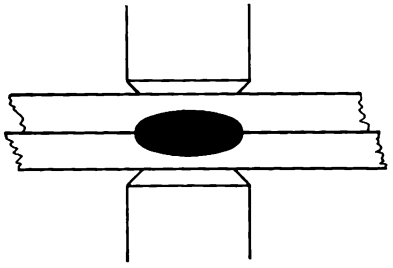


Fig. 34
Point de soudure, Volume de métal appartenant aux deux pièces, porté à la température de fusion, puis refroidi.

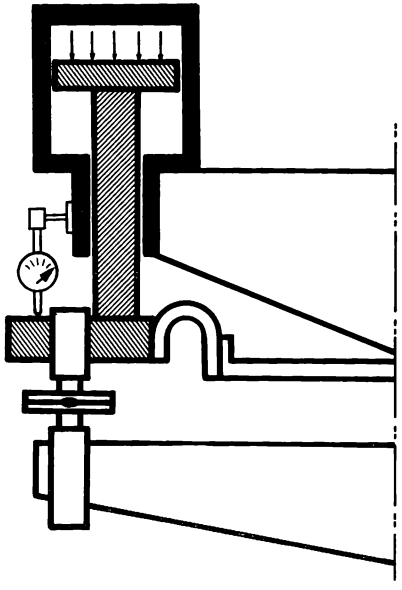


Fig. 35
Montage spécial servant à la mesure des variations d'épaisseur des tôles à l'endroit du point de soudure, pendant l'opération de soudage.

ASPECT MÉTALLURGIQUE DU SOUDAGE PAR POINTS

Le soudage par points est une véritable opération métallurgique. En effet, il consiste à porter à la température de fusion, puis à refroidir, un volume déterminé de métal situé au contact de deux pièces à assembler (fig. 34).

Le processus thermique suivant lequel s'accomplit la soudure, et les qualités tant métallurgiques que mécaniques du point soudé dépendront :

a) des caractéristiques mêmes des métaux à souder;

b) des facteurs de réglage : intensité du courant de soudage, temps de soudage, effort de compression aux électrodes, etc.

Aucun métal d'apport n'est ajouté.

Les phénomènes thermiques du soudage par points seront étudiés en prenant comme base d'analyse l'acier doux. Les principes généraux qui en découleront, pourront être appliqués aux aciers spéciaux, aux autres matériaux ferreux et non-ferreux, en tenant compte de leurs caractéristiques propres.

Période de chauffage.

Comme le montrent les macrographies données à la figure 28, en soudage par points, le passage du courant dans des conditions déterminées, donne lieu à un échauffement très localisé au contact de deux tôles, qui aboutit rapidement à la fusion d'un noyau de métal appartenant aux deux pièces.

Pendant son échauffement progressif, la lentille de métal se dilate. La dilatation provoquée par l'augmentation de température peut être mise en évidence au moyen d'un montage dilatométrique comme représenté schématiquement à la figure 35. Ce montage permet la mesure des variations des épaisseurs des tôles pendant la formation du point de soudure.

Le diagramme de la figure 36 donne les variations d'épaisseurs de deux tôles d'acier doux, de 6 mm d'épaisseur, en cours de soudage.

Au moment où elle atteint la température de fusion, cette petite masse liquide qui constitue le point de soudure, tend fortement à s'échapper d'entre les tôles. La poussée du métal en fusion, pour sortir du creuset métallique qui l'entoure, ne sera neutralisée que grâce à l'intervention d'un effort de compression suffisant et c'est là un nouveau rôle très important de l'effort de compression aux électrodes.

Si cet effort de compression est trop faible, le métal s'échappe entre les tôles sous forme de particules plus ou moins importantes appelées « projections ».

Ce phénomène de projections entraîne l'expulsion d'une partie du métal formant le point de soudure et peut ainsi donner lieu à des défauts internes (vides, porosités), altérant considérablement la qualité du point.

La figure 38 représente la macrographie d'un point de soudure réalisé avec un effort de compression insuffisant.

On peut observer la présence d'un vide interne important au sein du point même.

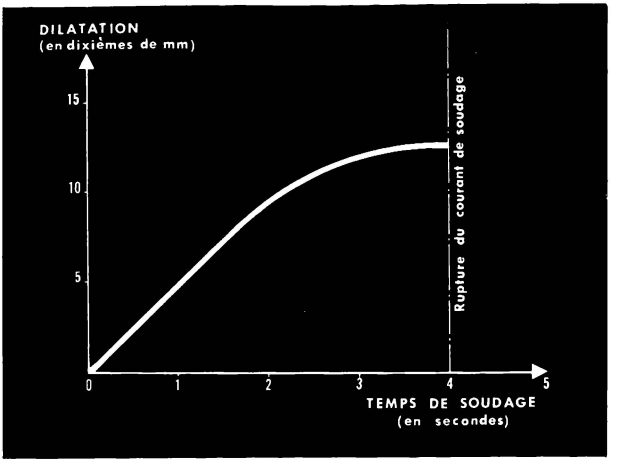


Fig. 36
Variations d'épaisseurs de deux tôles à l'endroit du point de soudure, pendant la période de chauffage. Tôles en acier doux de 6 mm d'épaisseur.

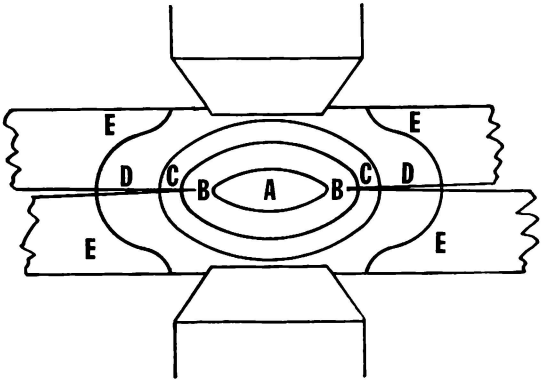


Fig. 37
Etat thermique d'un point de soudure assemblant deux tôles en acier doux, à la fin de la période de chauffage.

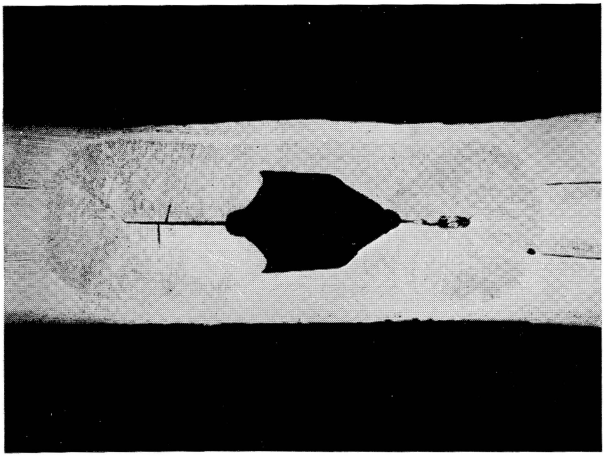


Fig. 38
Vide interne important dans un point de soudure réalisé avec effort de compression insuffisant pendant la période de chauffage (acier doux).

Les projections de métal en fusion doivent être éliminées ou tout au moins réduites, non seulement en donnant une valeur suffisante à l'effort de compression, mais aussi en évitant d'engendrer un excès d'énergie calorifique, c'est-à-dire, en dosant parfaitement $RI^2 t$.

Au moment de la coupure du courant de soudage, c'est-à-dire, quand l'apport d'énergie calorifique au point de soudure et aux masses l'environnant, cesse, l'état thermique du point est tel que schématisé à la figure 37 :

— Une zone centrale (A) portée à la température de fusion;

— Une zone (B), gaine de métal à l'état plastique entourant la plage centrale en fusion.

La température de la zone (B) est fort supérieure à la température critique :

— Une zone (C) atteignant à peu près la température critique;

— Une zone (D) portée à une température inférieure à la température critique;

— Une zone (E) restée à la température ambiante.

Du centre du point jusqu'à la périphérie, l'échelle thermique s'étend de la température de fusion à la température ambiante. Le gradient de température est généralement élevé. L'interruption du courant de soudage détermine la fin de la période d'échauffement, et marque le début de la deuxième phase de l'opération : la phase de refroidissement ou de solidification du point de soudure.

Refroidissement du point de soudure.

Le refroidissement peut avoir lieu de deux manières différentes :

a) le point peut être refroidi librement, l'effort de compression des électrodes étant éliminé au moment de l'interruption du courant de soudage;

b) le point peut être refroidi avec maintien de l'effort de compression aux électrodes pendant un certain temps après l'interruption du courant de soudage.

Le noyau de métal fondu se trouve au sein d'une masse métallique refroidissante relativement importante, constituée par les pièces soudées mêmes et par les électrodes. Il peut être comparé à un métal coulé qui se refroidit dans la lingotière.

Le refroidissement du noyau fondu va progresser de la périphérie vers le centre et il sera d'autant plus rapide que le gradient de température est élevé.

Des échanges thermiques vont s'établir entre une source froide — la périphérie — et une source chaude — le noyau fondu — à travers des zones de températures décroissantes allant de la température de fusion à la température ambiante, à l'état initial.

Dans le cas du refroidissement sous pression, les électrodes, pourvues d'un dispositif de refroidissement, constituent une source froide maintenue à une température à peu près constante, directement en contact avec les surfaces extérieures des tôles à l'endroit du point de soudure.

La masse des pièces mêmes environnant la zone soudée contribue également au refroidissement de celle-ci. Les échanges thermiques sont rapides, car le gradient de température reste élevé.

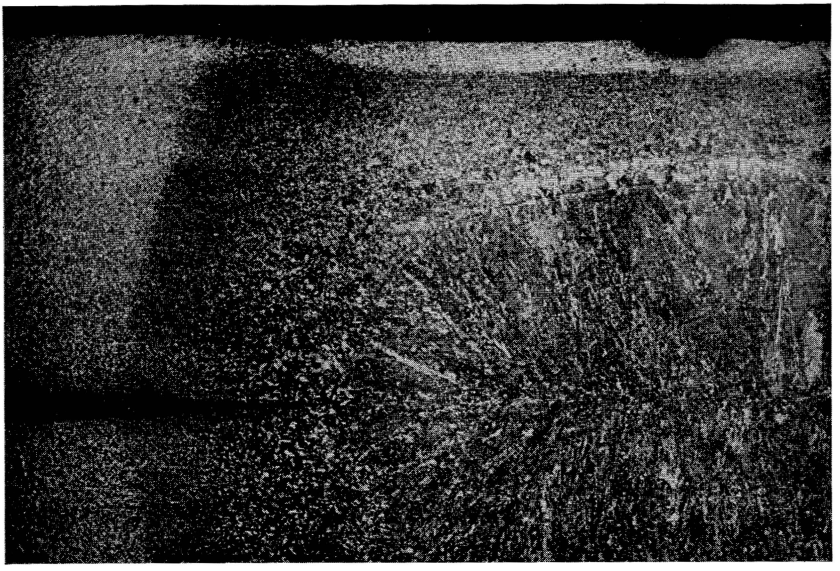


Fig. 39

Macrographie d'un point de soudure assemblant deux tôles en acier doux de 5 mm d'épaisseur.

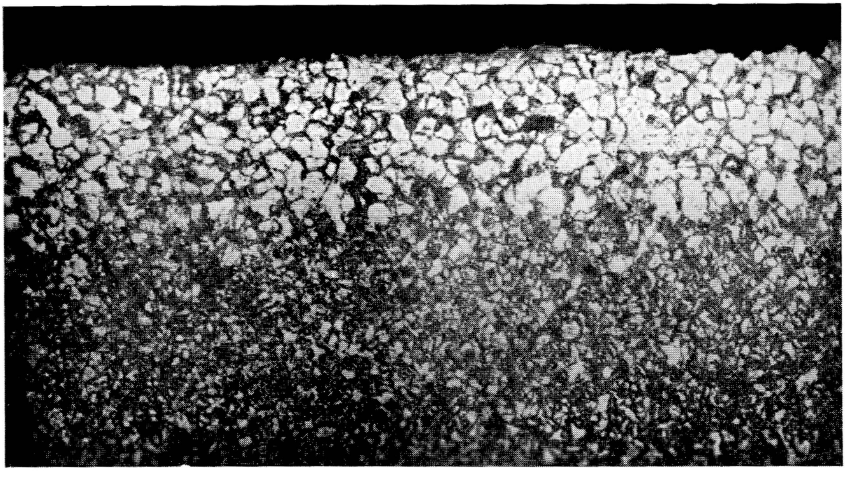


Fig. 40

Micrographie de la zone superficielle du point de soudure de la figure 39. On distingue à la périphérie la structure inchangée du métal de base et en dessous la zone d'affinage du grain.

La cristallisation du noyau fondu commence à la périphérie de la plage B chauffée à température très élevée et maintenue à cette température par le noyau même.

La cristallisation a lieu sous forme de dendrites qui convergent vers le centre du point. Pendant ce temps, les grains de la zone B, maintenus à haute température, ont subi un certain grossissement et ils commencent à se refroidir assez lentement. La plage D en contact avec les électrodes, s'est refroidie rapidement, sans modification de texture, puisque pendant toute l'opération sa température a été maintenue à une valeur légèrement supérieure à la température ambiante.

La plage C, chauffée initialement un peu au-dessus de la zone critique, se refroidit d'autant plus rapidement qu'elle est proche des pointes d'électrodes. Les grains de cette plage se sont affinés.

Les figures 39, 40 et 41 donnent divers aspects macrographiques que présente la section d'un point de soudure assemblant deux tôles en acier doux.

Dans le cas du refroidissement libre, sans pression, dès que le courant de soudage est interrompu, les électrodes s'écartent des pièces soudées et cessent d'être en contact avec celles-ci.

Il n'y a plus, comme masse refroidissante, que les pièces soudées mêmes. Les échanges thermiques seront moins rapides que dans le premier cas.

Au moment de la rupture du courant, le gradient de température est élevé, mais il tend à devenir plus faible pendant le refroidissement. La température de la zone soudée s'uniformise et atteint une valeur assez élevée.

Les dimensions de la plage B augmentent tandis que la plage C est déplacée vers la périphérie du point.

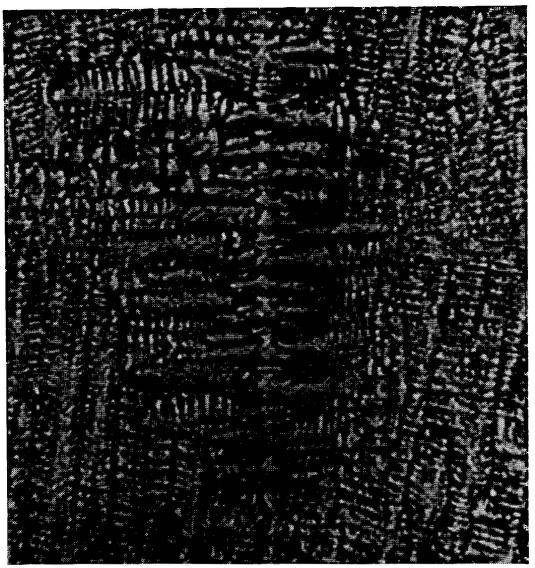


Fig. 41
Dendrites dans la région centrale du point de soudure de la figure 39.

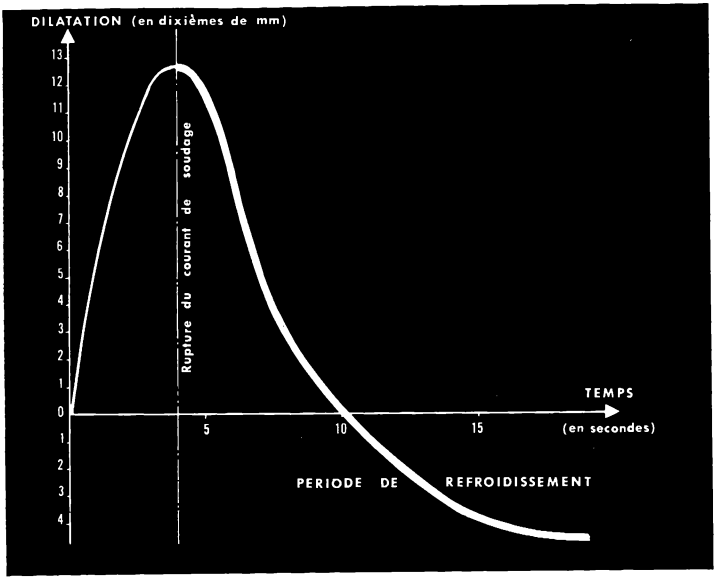


Fig. 42

Variations d'épaisseurs de deux tôles à l'endroit du point de soudure. pendant la période de refroidissement du point. — Tôles en acier doux de 6 mm d'épaisseur.

De ce fait, une zone plus ou moins importante constituée par du métal à gros grains entoure la zone centrale à structure dendritique.

Nous allons maintenant étudier le rôle important joué par la pression des électrodes pendant cette dernière phase de l'opération de soudage.

Le graphique (fig. 42) donne un enregistrement des contractions du point au cours du refroidissement. A la fin du refroidissement, la dilatation enregistrée est négative. Elle montre le travail mécanique effectué à chaud par les électrodes, après interruption du courant de soudage. Le refroidissement du noyau fondu a été comparé au refroidissement d'un métal coulé en lingotière mais ce noyau ou point de soudure, adhère de toutes parts aux parois de sa lingotière.

Les gaz dissous dans le métal en fusion sont mis en liberté et forment des bulles. L'importance et le nombre de ces bulles de gaz dépendront du métal de base, de la température. Une partie de ces bulles se dégage quand le métal est encore suffisamment liquide. Après l'interruption du courant de soudage, la température de la zone soudée diminue progressivement, le métal du noyau devient de plus en plus visqueux. Dans ces conditions, des bulles de gaz ont tendance à rester emprisonnées dans le noyau sous forme de *soufflures*. En passant de l'état liquide à l'état solide, le noyau de soudure subit une contraction volumétrique très importante. Le gradient de température de la zone soudée ayant comme centre le noyau, est très élevé. Le noyau de métal chaud se trouve entouré d'une enveloppe de métal froid peu déformable. Le refroidissement n'est pas uniforme.

La solidification du noyau commence à la périphérie et le retrait des couches périphériques solidifiées tend à former, au sein du point soudé, des cavités, des creux appelés *retassures*.

L'effort de compression transmis par les électrodes, pendant la solidification, contraint l'enveloppe de métal froid à se déformer et à suivre la contraction du métal chaud. De cette façon, un effort de compression suffisant pendant la phase de refroidissement empêche la formation des soufflures et des retassures dans le point soudé même.

Notons que très souvent, surtout pour les fortes épaisseurs, une petite retassure centrale subsiste dans les points de bonne qualité.

Le retrait calorifique du point de soudure ayant lieu au sein d'une masse à une température relativement basse et donc peu déformable, des sollicitations par traction prennent naissance dans tout le point.

Si ces tensions internes sont supérieures en certains endroits, à la résistance mécanique du métal, des ruptures appelées *tapures* se forment dans le noyau de soudure.

Les bulles de gaz et les retassures qui diminuent la section du point soudé et par conséquent diminuent sa résistance mécanique aux tensions internes de retrait, favorisent la formation de tapures (voir fig. 43, 44 et 45).

Le rôle joué par le maintien de l'effort de compression des électrodes pendant le refroidissement du point est donc de première importance pour la suppression ou la limitation des soufflures, retassures et tapures qui tendent à prendre naissance lors de la solidification du noyau.

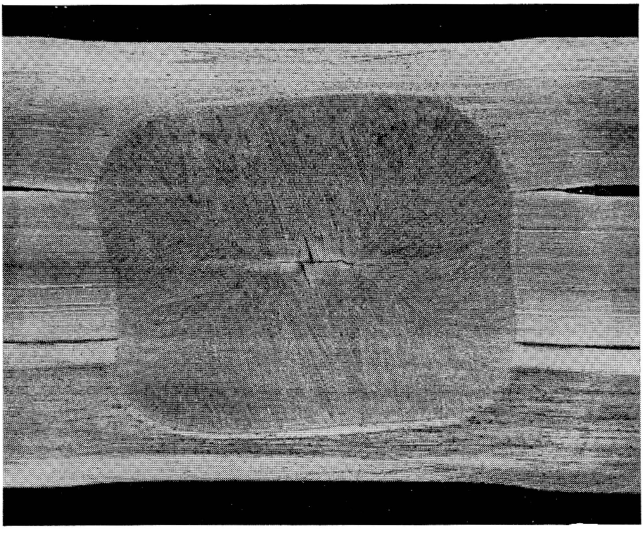


Fig. 43

Point soudé assemblant trois tôles en acier doux, présentant une tapure centrale.

La cassure d'un point refroidi avec maintien de l'effort de compression est saine et homogène, tandis que la cassure d'un point refroidi librement, sans pression, présente toujours un grand nombre de vides internes, de porosités, de fissures. Ces deux aspects caractéristiques sont illustrés aux figures 46 et 47.

Les caractéristiques mécaniques d'un point soudé refroidi librement seront toujours nettement moins bonnes que celles d'un point soudé refroidi avec maintien de la pression, les autres conditions de soudage étant les mêmes dans les deux cas.

D'une façon générale, le processus thermique suivant lequel le point de soudure va se réaliser, et qui aura une influence considérable sur la qualité du point, dépendra :

— des métaux à souder (analyse, caractéristiques métallurgiques, etc.) ;

— des facteurs de réglage : intensité du courant de soudage, temps de soudage, effort de compression.

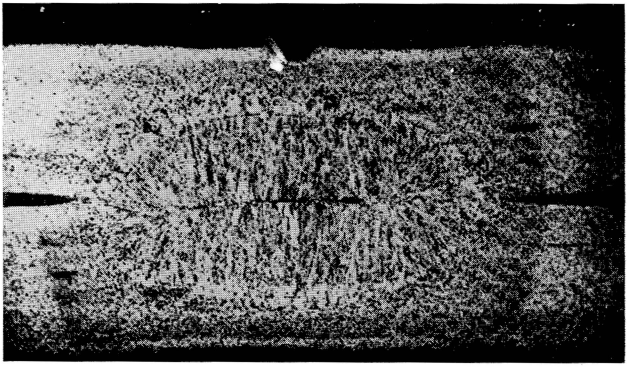


Fig. 44

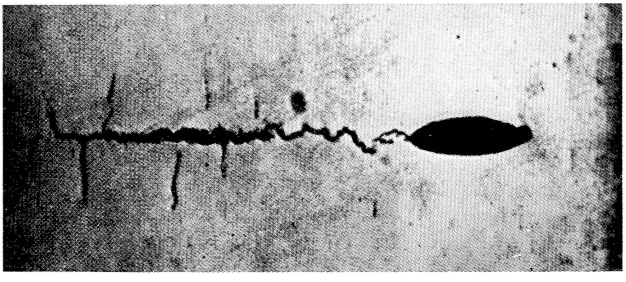


Fig. 45

Tapures et retassures dans un point soudé assemblant deux tôles en acier doux.

Fig. 44. — Grossissement 4. Fig. 45. — Grossissement 17.

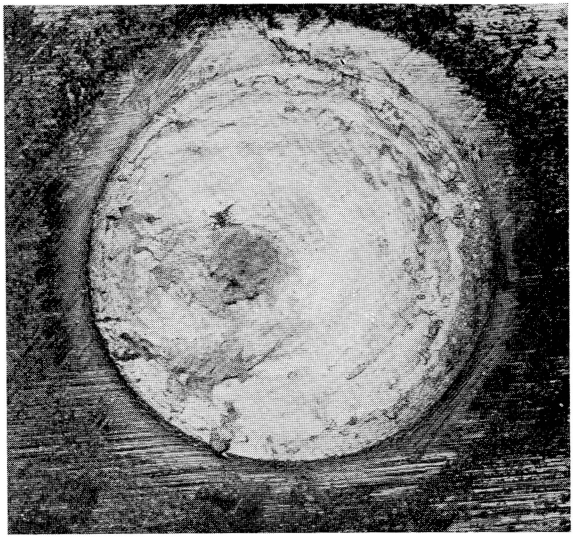


Fig. 46

Fig. 47

Points soudés assemblant deux tôles en acier doux. Rupture par torsion.

Fig. 46. Refroidissement avec maintien de l'effort de compression.

Fig. 47. Refroidissement libre. Effort de compression sur le point soudé, supprimé au moment de l'interruption du courant de soudage.

En soudage par points, le refroidissement du noyau après interruption du courant est rapide (gradient de température élevé, masse refroidissante importante par rapport à la faible masse du point). La vitesse de refroidissement sera d'autant plus élevée que le temps de soudage sera court. Pour certains matériaux, il est absolument nécessaire d'utiliser des temps de soudage longs, ou bien des cycles de courant et des cycles de pression spéciaux, des cycles de courant avec pulsations, ou avec préchauffage et recuit. Ceux-ci seront étudiés ultérieurement.

ÉTUDE DES PARAMÈTRES DU SOUDAGE PAR POINTS

Une opération de soudage par points comporte la détermination préalable des valeurs à donner aux variables suivantes, pour obtenir un point de soudure d'un diamètre déterminé :

— Intensité du courant électrique de soudage (courant électrique qui traverse les pièces à souder).
— Temps de passage du courant de soudage (ou temps de soudage).
— Dimensions des pointes d'électrodes.
— Effort de compression aux électrodes.
— Temps d'accostage.
— Temps de maintien.

Ces valeurs dépendront :

— de la nature des matériaux à souder :
  caractéristiques mécaniques,
  caractéristiques électriques,
  conductibilité thermique,
  chaleur spécifique, chaleur latente de fusion,
  composition chimique et état métallurgique,
— des épaisseurs des pièces à souder, de leur forme,
— des états de surface,
— de la classe du point de soudure désirée,
— des exigences d'aspect extérieur après soudage, etc.

Tous ces facteurs de réglage dépendent très intimement l'un de l'autre, c'est-à-dire que la modification de la valeur de l'un deux peut entraîner la nécessité d'en modifier on ou plusieurs autres.

L'étude de l'influence de ces divers facteurs de réglage est assez complexe.

INTENSITÉ DU COURANT DE SOUDAGE ET TEMPS DE SOUDAGE

La chaleur nécessaire pour assurer la fusion du volume de matière constituant le point de soudure est égale à :

$$Q = V \cdot s \cdot c_1 \cdot T + V \cdot s \cdot c_2$$

Q = quantité de chaleur;
V = volume du point de soudure;
s = poids spécifique du matériau à souder;
c_1 = chaleur spécifique;
T = différence entre la température de fusion et la température ambiante;
c_2 = chaleur latente de fusion.

$$Q = V \cdot s \, (c_1 \cdot T + c_2)$$

Cette énergie calorifique est fournie par la transformation de l'énergie électrique RI^2t. Cette énergie kRI^2t calories sera naturellement supérieure à Q calories, car il faut tenir compte des pertes calorifiques par rayonnement et conduction dans les matériaux à souder et dans les électrodes.

$$kRI^2t = \frac{Q}{\eta} \; (\eta = \text{rendement de l'opération})$$

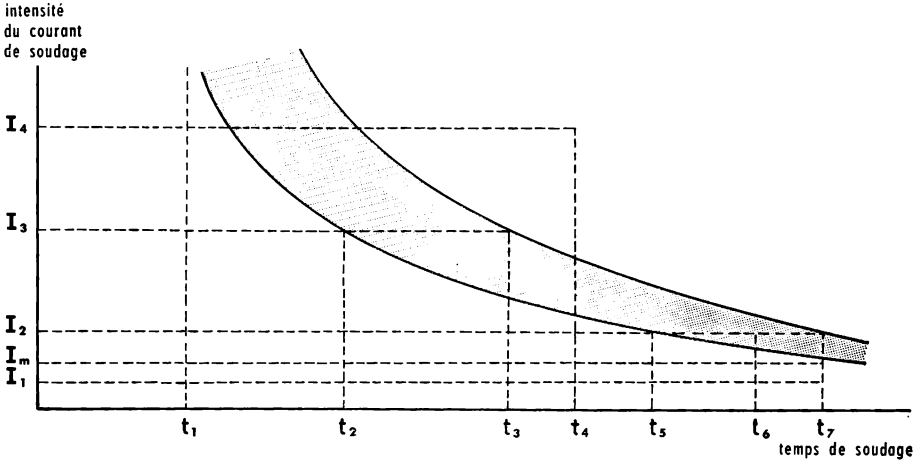


Fig. 48
Diagramme de soudabilité donnant la relation entre l'intensité du courant et le temps du soudage.

La quantité de chaleur engendrée localement par le passage du courant électrique dans les pièces à souder, sera proportionnelle :

— à R (complexe de résistances) qui dépend de la nature même des matériaux à souder, et de l'effort de compression aux électrodes;
— au carré de l'intensité I du courant de soudage;
— au temps t du passage de ce courant.

On pourra donc agir sur ces deux facteurs I et t pour provoquer la fusion d'une quantité de matière déterminée.

Le temps et l'intensité dépendent l'un de l'autre, c'est-à-dire qu'à une intensité donnée correspond un temps donné et il existe un grand nombre de combinaisons qui donnent une même valeur $RI^2 t$:

$$Q = R \cdot I \cdot I \cdot t = R\, I^2 t$$

$$Q = R \cdot \frac{I}{2} \cdot \frac{I}{2} \cdot (4\, t) = R\, I^2 t$$

$$Q = R \cdot \frac{I}{3} \cdot \frac{I}{3} \cdot (9\, t) = R\, I^2 t$$

$$Q = R \cdot \frac{I}{n} \cdot \frac{I}{n} \cdot (n^2\, t) = R\, I^2 t$$

Mais on ne peut pas indéfiniment diminuer la valeur de I et augmenter la valeur de t.

Il existe une intensité de courant minimum en dessous de laquelle la soudure n'est pas possible. Cette intensité minimum dépendra des caractéristiques des matériaux à souder, de leur épaisseur, des dimensions des pointes d'électrodes et de l'effort de compression.

Ou bien on peut dire d'une façon plus générale qu'il existe une densité de courant minimum qui est fonction des caractéristiques des matériaux à souder, de leur épaisseur et de la pression spécifique sur le point de soudure.

Pour chaque cas de soudage, avec des pointes d'électrodes, de dimensions données, et pour un effort de compression déterminé, on peut tracer un diagramme de soudabilité donnant la relation entre l'intensité du courant et le temps de soudage (voir fig. 50).

A chaque valeur de l'effort de compression correspondra un diagramme particulier. Ce diagramme est caractérisé par trois zones (voir fig. 50).

A. Zone de collages : la fusion n'est pas atteinte; soudure impossible;
B. Zone de soudage;
C. Zone de projections, et même de détériorations, des pièces soudées et des électrodes.

Pour un courant I_1 inférieur à I_{min}, intensité minimum de soudage, la soudure n'a pas lieu quel que soit le temps de soudage. Les tôles s'échauffent plus ou moins fortement, mais les calories engendrées à l'endroit du joint sont dispersées au fur et à mesure de leur production.

A l'état d'équilibre, la température atteinte est inférieure à la température de fusion du matériau.

Pour une intensité de courant I_2 supérieure à I_1, aux temps t_1, t_2 et t_3, la fusion n'est pas atteinte, un simple collage a pris naissance à l'endroit du joint. Au temps t_5, la température de fusion est atteinte au joint des pièces, la soudure commence et se développe correctement pour une augmentation du temps de t_5 à t_7.

Pour une intensité de courant I_3 supérieure à I_2, la température de fusion est atteinte après un temps t_2 inférieur à t_5.

La zone B qui caractérise la zone de soudage dépend des caractéristiques des métaux à souder. Pour certains métaux, cette zone est étroite et dans ce cas, I et t doivent être réglés avec précision.

Si pour un temps de soudage t_4 la valeur de l'intensité de courant est I_4, le point est en dehors de la zone de soudage, et se trouve dans la zone C ; dans ces conditions, pour l'effort de compression donné, la quantité de chaleur fournie au point de soudure est excessive.

Le phénomène de projection (expulsion de métal en fusion) apparaît.

Si l'on augmente encore les valeurs de l'intensité du courant et du temps de soudage, les projections s'amplifient. Finalement la fusion a lieu au contact des électrodes qui se détériorent. Les points de soudure sont brûlés.

TEMPS DE SOUDAGE LONGS OU TEMPS DE SOUDAGE COURTS.

Pour des valeurs d'intensité égales ou légèrement supérieures à l'intensité minimum de soudage, le temps de passage du courant doit être très long. C'est le soudage lent.

Pour des valeurs d'intensité très supérieures à l'intensité minimum de soudage, les temps nécessaires sont de plus en plus courts. C'est le soudage rapide.

La technique de soudage rapide s'est généralisée grâce aux grands avantages qu'elle apporte.

Les temps de soudage, qui antérieurement étaient de l'ordre de plusieurs secondes, même pour l'assemblage de tôles de faible épaisseur, sont actuellement de quelques périodes.

Les pertes calorifiques par conduction dans les tôles et les électrodes seront d'autant plus faibles que le temps de soudage sera court.

Le rendement de l'opération sera donc d'autant plus élevé que le courant de soudage est intense et le temps de chauffage court.

On peut admettre que les temps de soudage courts sont inversement proportionnels au carré du courant.

Des temps de soudage courts favorisent la tenue correcte des électrodes. Grâce à la rapidité du soudage, seule la zone du point de soudure est portée à haute température et la soudure est terminée avant que la surface des pièces en contact avec les électrodes atteigne une température élevée. De cette façon, les pointes d'électrode maintenues à une température assez basse, conservent leur dureté et ne se déforment pas. Les diamètres des pointes d'électrode gardent leur valeur initiale et la densité de courant de soudage reste constante et assure une bonne régularité du travail.

La lenteur du chauffage donne lieu à un échauffement d'un volume important de métal qui dépasse largement la zone du point de soudure. Les électrodes en contact avec un métal à l'état plastique laisseront dans les pièces des empreintes profondes. Les déformations après soudage pourront être excessives.

Les résistances mécaniques des soudures exécutées avec des temps de soudage très longs sont généralement très inférieures aux résultats obtenus en utilisant des temps de soudage plus courts.

Pour certains cas d'assemblage, le soudage rapide s'impose comme condition indispensable.

Tel le cas des matériaux dont la conductibilité thermique est très élevée (par exemple aluminium et ses alliages, laiton, etc.).

Tel le cas de pièces de forme spéciale qui exige une localisation parfaite du dégagement de chaleur dans une zone très étroite, localisation qui ne peut être assurée que par un temps court.

Tel également le cas du soudage de métaux dont les températures de fusion sont très différentes.

Si généralement le soudage rapide doit être appliqué grâce à ses avantages nombreux, le soudage avec temps longs est cependant nécessaire dans certains cas particuliers.

En effet, le temps de soudage influe sur la vitesse de refroidissement du point après interruption du courant de soudage. Par des temps de soudage longs, les zones adjacentes au point sont portées à une température plus ou moins élevée, le gradient de température diminue; les échanges thermiques entre le point et les zones adjacentes sont ralentis et la vitesse de refroidissement du point diminue. Pour les aciers au carbone ayant une teneur en carbone égale ou légèrement supérieure à 0,3 % et pour certains aciers alliés, un temps de soudage long est indispensable pour diminuer l'effet de trempe, et dans le cas de certains alliages, un temps long est également nécessaire pour diminuer la formation de criques intérieures et extérieures.

Les pièces à accostage difficile exigent également des temps de chauffage relativement longs. En effet, si pour ce cas on utilisait des temps de soudage très courts, le soudage serait terminé avant que la localisation de la soudure n'ait pu se faire correctement à l'endroit voulu. L'accostage se réalise plus parfaitement pendant les premiers temps du passage du courant grâce au ramollissement, dû au chauffage, de l'endroit à souder. Il en est de même pour les pièces recouvertes de calamine.

RELATION ENTRE LE DIAMÈTRE DU POINT DE SOUDURE, L'INTENSITÉ DU COURANT ET LE TEMPS DE SOUDAGE.

La loi de variation du diamètre du point soudé en fonction du temps de passage du courant est donnée à la figure 49.

Elle est différente selon qu'il s'agit de tôles fines (jusqu'à 3 mm d'épaisseur) ou de tôles épaisses (épaisseur supérieure à 3 mm).

Cette particularité est montrée aux figures 50 et 51 dont l'une est relative à des tôles en acier doux, épaisseur 1 mm, et l'autre à des tôles également en acier doux mais de 5 mm d'épaisseur.

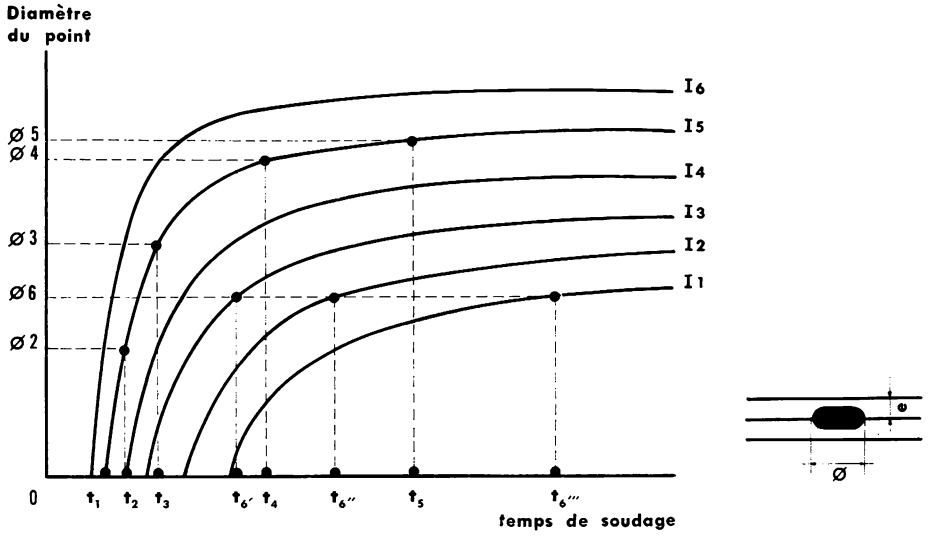


Fig. 49

Diagramme des courbes « diamètre de point en fonction des temps de soudage » pour différentes intensités du courant de soudage

$I_6 > I_5 > I_4 > I_3 > I_2 > I_1$; e = constante.

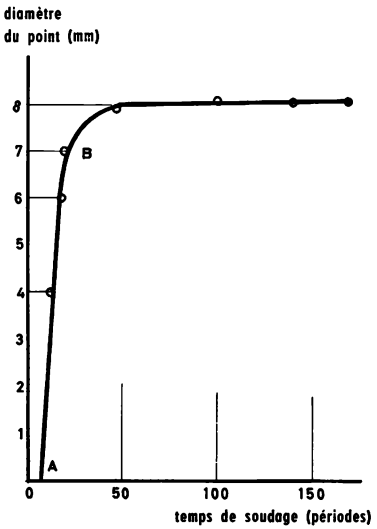


Fig. 50

Tôles d'acier de 1 mm.
Intensité : 7 800 A.

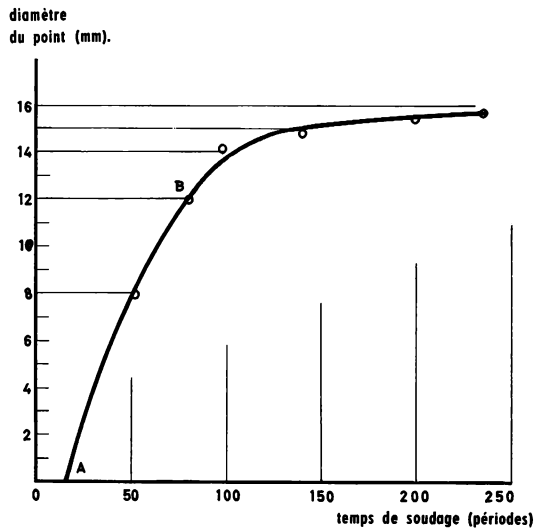


Fig. 51

Tôles d'acier de 5 mm
Intensité : 16 500 A.

Pour des tôles de faible épaisseur, la branche AB de la courbe est presque verticale : la fusion du diamètre maximum est atteinte très rapidement.

Au contraire, pour les tôles épaisses, la branche AB de la courbe accuse une inclinaison assez prononcée; cette allure inclinée de la courbe montre une augmentation plus lente du diamètre du point; la fusion progresse de moins en moins vite.

Le temps de soudage sera choisi de façon à dépasser le genou B de la courbe donnant le diamètre du point en fonction du temps. En effet, dans la partie ascendante (A-B) de la courbe, une faible variation du temps de soudage, de l'intensité de courant, de la résistance de contact entre tôles pourrait provoquer une forte variation du diamètre du point.

Prenons comme exemple la courbe I_5 de la figure 49.

Pour un temps de passage du courant égal à t_1 il n'y a formation d'aucun point de soudure : la partie située entre les deux tôles a été amenée à la température de fusion mais, à ce moment, le courant de soudage a été interrompu.

Pour un temps t_2 et t_3, on constate la formation d'un point de soudure de plus en plus grand.

On remarque ensuite que pour un temps de t_4 et t_5, le diamètre s'est pratiquement stabilisé et qu'une forte augmentation du temps de soudage n'entraîne qu'une augmentation peu sensible du diamètre soudé.

Dans cette partie de la courbe, la presque totalité de l'énergie calorifique engendrée est évacuée au fur et à mesure, par les tôles et les électrodes, et ne contribue donc pas à fondre plus de matière.

Aussi, le bon réglage du temps de soudage est-il situé aux environs de t_4. On évite donc de se trouver dans la partie ascendante de la courbe où une faible irrégularité du temps de soudage entraînerait une forte variation du diamètre du point soudé ($t_2 - \Phi_2$, $t_3 - \Phi_3$).

Reprenons le diagramme de la figure 49 et supposons avoir les soudeuses 1, 2 et 3, dont les intensités maxima sont respectivement I_1, I_2 et I_3.

Supposons en plus que le diamètre idéal pour une épaisseur C soit Φ_6. On constate immédiatement que la détermination de la capacité maximum de soudage est une chose malaisée.

En effet, la soudeuse 1, tout comme les soudeuses 2 et 3, permet d'obtenir un point de diamètre Φ_6 (temps t'_6, t''_6 et t'''_6).

C'est ainsi, que les capacités maxima renseignées par les constructeurs de soudeuses, varient du simple au double, voire au triple, pour des soudeuses de même puissance.

Inversement, si on admet une même capacité maximum de soudage pour les soudeuses 1, 2 et 3, on pourra dire que la soudeuse 3 est d'une qualité supérieure à la soudeuse 1, car on remarque que pour la soudeuse 1 le temps de soudage est exagérément long, qu'il est plus court pour la soudeuse 2 et qu'il est idéal pour la soudeuse 3 dont la consommation est la plus faible pour un même résultat.

En plus, une zone plus petite sera affectée par l'échauffement dans le cas de la soudeuse 3, ce qui est favorable, du moins pour l'acier doux.

Toutefois, ce n'est pas seulement l'intensité du courant de soudage qui détermine la capacité d'une machine, mais aussi l'effort de soudage maximum qu'elle peut exercer. Cet effort détermine partiellement la finesse du grain du métal fondu et donc sa qualité.

Nous examinerons plus en détail l'influence du facteur effort de soudage dans un paragraphe suivant.

DENSITÉS DE COURANT DE SOUDAGE.

La densité du courant de soudage dans le point est le nombre d'ampères par millimètre carré de section soudée qui traverse les pièces pendant l'opération de soudage :

$$\Delta \text{ Ampères/mm}^2 = \frac{\text{Intensité du courant de soudage (A)}}{\text{section du point soudé (mm}^2\text{)}}.$$

Section du point soudé : $S = \frac{\pi d^2}{4}$ mm² (figure 52).

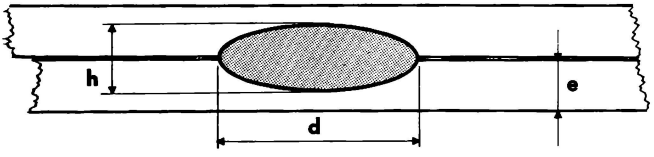


Fig. 52

Point de soudure.

d : diamètre du point soudé ou de la zone fondue.
h : pénétration.
e : épaisseur.

La densité de courant de soudage nécessaire devra être d'autant plus élevée que les facteurs suivants auront des valeurs faibles :

— la résistance de contact entre tôles, propre au matériau;
— la résistance électrique des portions de pièces à souder comprises entre les électrodes. Elle dépend de la résistivité propre des matériaux, de leur épaisseur;
— le rendement η de l'opération intervenant dans la formule ci-dessous et qui dépend de l'épaisseur des pièces, et surtout de la conductibilité thermique des matériaux à assembler. Le soudage devra être d'autant plus rapide que la conductibilité thermique est élevée;
— le temps de soudage.

Pour un alliage déterminé, on peut écrire :

$$\frac{Q}{\eta} = k\,RI^2\,t = V\,(s\,.\,c_1\,.\,T + s\,.\,c_2) \qquad \text{(voir page 68)}$$
$$= k_1\,.\,V.$$

En s'imposant une hauteur du point soudé (pénétration) proportionnelle à l'épaisseur des tôles, on écrit :

$$k\,RI^2\,t = k_2\,.\,S\,.\,\mathrm{e}.$$

Prenant pour R une valeur moyenne supposée constante, on écrit :

$$k\,.\,\rho\,.\,\frac{2\,\mathrm{e}}{S}\,.\,I^2\,.\,t = k_2\,.\,S\,.\,\mathrm{e}$$

d'où $$I_2\,t = k_3\,.\,S^2$$

et $$I\sqrt{t} = k\,S.$$

Pour un temps de soudage $t = 1$, la relation devient :

$$I = K\,.\,S.$$

Les valeurs de K qui s'expriment en ampères par millimètre carré et pour un temps de soudage d'une période, ont pu être déterminées approximativement. Elles peuvent servir de base pour l'établissement d'un réglage :

— pour l'acier doux propre, $K = 1\,250$ A/mm² pour 1 période;
— pour l'acier inoxydable 18/8, $K = 800$ à $1\,000$ A/mm² pour 1 période;
— pour l'aluminium, $K = 4\,000$ à $4\,500$ A/mm² pour 1 période;
— pour les alliages d'aluminium, $K = 3\,000$ à $4\,000$ A/mm² pour 1 période.

Soit par exemple à souder deux tôles en acier doux propre de 1,5 mm d'épaisseur.

Diamètre du point : 6 mm.
Temps de soudage : 10 périodes (par exemple).

La section du point à obtenir est donc :

$$S = \frac{\pi\, d^2}{4} = \frac{\pi \times 36}{4}.$$

$$I = 1\,250 \times \frac{\pi \times 36}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{10}} = \text{environ } 11\,200 \text{ A.}$$

Les densités de courant sont plus élevées pour les tôles fines que pour les tôles épaisses.

Les densités de courant élevées que nécessite le soudage de l'aluminium et des alliages d'aluminium sont justifiées par les caractéristiques spéciales de ces matériaux (voir tableau ci-dessous) :

— leur excellente conductibilité électrique;
— la faible valeur de la résistance de contact aluminium-aluminium ;
— leur chaleur spécifique élevée;
— leur très bonne conductibilité thermique défavorable à un échauffement localisé, qui nécessite un temps de soudage très court et de ce fait une intensité de courant de soudage d'autant plus importante.

Les tableaux des pages 77 et 78 donnent des réglages de base pour le soudage par point de diverses épaisseurs de tôles en acier doux propre, acier inoxydable, alliages d'aluminium.

Il est bien entendu que d'autres valeurs de paramètres de soudage peuvent être choisies. Les intensités de courant renseignées sont des valeurs moyennes souhaitables, mais il est possible de souder les épaisseurs données avec des intensités de courant plus faibles ou plus fortes. Le choix de ces valeurs dépend de la qualité de soudure, ou classe de soudure désirée.

Les valeurs des intensités de courant dépendront également de la distance entre points de soudure qui conditionne les dérivations de courant par les points adjacents.

Tableau A

Quelques caractéristiques de divers matériaux

Matériaux	Point de fusion (°C)	Chaleur spécifique calories (°C/gr)	Chaleur latente de fusion calories (gr)	Conductibilité thermique calories (gr/°C/cm²/cm/sec)	Résistivité électrique microhms (cm²/cm)	Conductibilité électrique par rapport au cuivre (%)
Acier doux	1 500	0,14	65	0,16	16	11
Acier inoxydable 18/8	1 440	0,12	—	0,04	73	2,4
Aluminium	657	0,22	92	0,52	2,78	61,5
Cuivre	1 083	0,095	—	0,85	1,72	100

Tableau B
Soudage par points de l'acier doux propre

Epaisseur de la tôle (mm)	Intensité du courant de soudage (Ampères)	Temps de soudage (périodes)	Effort de compression de soudage (kg)	Diamètre du point de soudure (mm)
0,5	6 000	5	100	3,5
1	9 000	8	200	5
1,5	12 000	12	330	6,5
2	14 000	14	450	7,5
2,5	16 000	16	500	8
3	18 500	20	600	8,5

Tableau C
Soudage par points par pulsations de l'acier doux propre. Ces valeurs varieront suivant la distance entre points de soudure

Epaisseur de la tôle (mm)	Intensité du courant de soudage (Ampères)	Temps de chauffe (périodes)	Temps de repos (périodes)	Nombre de pulsations	Effort de compression de soudage (kg)	Diamètre du point de soudure (mm)
5	19 000	15	5	8	1 000	14
6,5	22 000	15	5	16	1 000 à 1 500	19
8	25 000	20	6	17	1 200 à 2 000	22

Tableau D
Soudage par points de l'acier inoxydable

Epaisseur de la tôle la plus mince (mm)	Intensité du courant de soudage (Ampères)	Temps de soudage (périodes)	Effort de compression de soudage (kg)	Diamètre du point de soudure (mm)
0,5	3 200	3	140	2,5
1	7 000	6	350	4,6
1,5	9 000	8	450	5,6
2	12 000	12	800	7
3	16 000	16	1 100	8,5

Tableau E

Soudage par points des alliages d'aluminium. Machine à souder à courant alternatif-monophasé

Epaisseur (mm)	Intensité du courant de soudage (Ampères)	Temps de soudage (périodes)	Effort de compression de soudage (kg)	Diamètre du point soudé (mm)
0,5	18 000	4	140	3
1	28 000	7	240	4,5
1,5	34 000	12	350	6
2	42 000	14	400	7
3	63 000	15	650	9

Tableau F

Soudage par points avec variation de pression et post-chauffage d'alliages d'aluminium. Machine à souder à redresseur

Epaisseur (mm)	Intensité du courant (Ampères)		Effort de compression (kg)		Temps (périodes)		Diamètre du point soudé (mm)
	soudage	post-chauffage	soudage	post-chauffage	soudage	post-chauffage	
1	33 000	—	350	—	4	—	4,5
1,5	42 000	30 000	500	1 200	7	7	6,2
2	51 000	35 000	650	1 500	10	12	7,5
3	65 000	45 000	1 000	2 500	12	20	9

CYCLES D'INTENSITÉ DE COURANTS DE SOUDAGE.

Soudage à intensité constante.

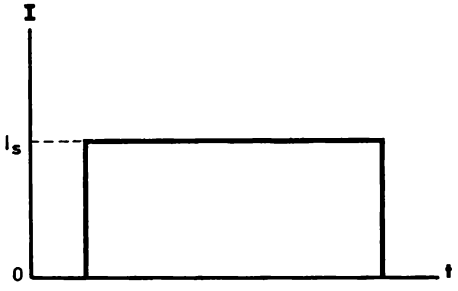


Fig. 53
Soudage à intensité constante.

Ce procédé de soudage est le plus couramment utilisé (voir fig. 53). Le courant de soudage est donc constant pendant toute la durée du chauffage à condition que la tension d'alimentation ne subisse pas de variation.

Soudage avec post-chauffage.

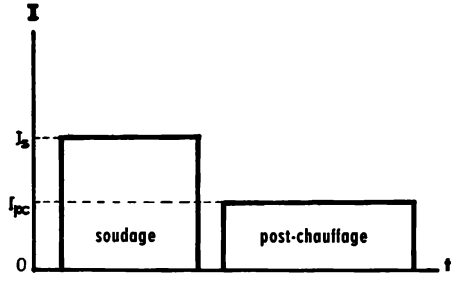


Fig. 54
Soudage avec post-chauffage.

Après la phase de soudage qui se réalise normalement à intensité constante, on provoque le passage d'un courant d'intensité inférieure à celle du courant de soudage (voir fig. 54).

Le but de ce mode de soudage est d'empêcher un refroidissement trop rapide du point. C'est un refroidissement contrôlé. Il n'est appliqué que pour des cas spéciaux : aciers à teneur en carbone moyenne se trempant pendant le soudage, aciers et alliages spéciaux, fortes épaisseurs.

Soudage avec préchauffage.

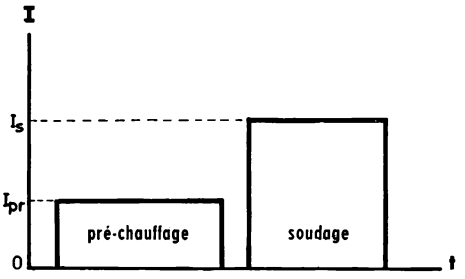


Fig. 55
Soudage avec préchauffage.

Un courant de faible intensité (très inférieure à l'intensité du courant de soudage) traverse les pièces à assembler et porte la zone à souder à une certaine température (inférieure à la température de fusion).

Il est immédiatement suivi du passage du courant de soudage qui assure la formation du point (voir fig. 55).

Le préchauffage augmente le volume de métal chauffé avoisinant le point.

Dans certains cas, le préchauffage est utilisé pour favoriser l'accostage de pièces offrant une certaine raideur. Pendant cette phase, grâce à l'augmentation de la température, les pièces se déforment plus facilement sous l'effet de l'effort de compression. Il est aussi utilisé pour diminuer l'effet de trempe de certains aciers.

Soudage par pulsations.

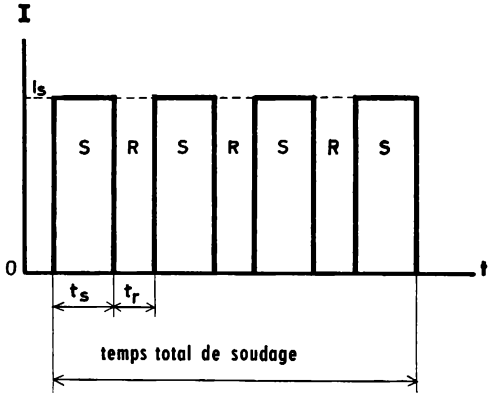


Fig. 56
Soudage par pulsations.

Le soudage pulsatoire consiste à remplacer l'échauffement continu par un échauffement fractionné obtenu par une succession d'enclenchements et de déclenchements du courant de soudage.

A chaque temps de passage du courant succède un temps de repos, les électrodes restant en contact sous pression sur les pièces pendant toute la durée de ces temps de chauffage et de repos.

Pendant chacun de ces temps de repos, les tôles et les électrodes absorbent une partie de la chaleur et c'est surtout la zone en contact avec les électrodes qui se refroidit tandis que le cœur de l'assemblage se refroidit beaucoup moins.

Le procédé consiste donc à accumuler la chaleur là où elle est utile: au joint des pièces à souder, et à l'éliminer là où elle est nuisible : sous les électrodes.

Ce procédé, appliqué surtout aux fortes épaisseurs, permet l'utilisation de pointes de courant plus faibles et d'efforts de compression modérés. Il donne également de bons résultats pour le soudage de pièces à accostage difficile et le soudage de certains aciers trempants (voir fig. 56).

Soudage avec établissement progressif du courant.

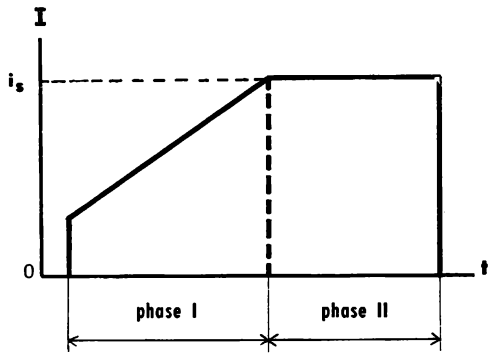


Fig. 57
Soudage avec établissement progressif du courant de soudage.

La valeur de l'intensité du courant de soudage n'est atteinte que progressivement à partir d'une intensité très faible (voir fig. 57). Ce procédé donne à peu près les mêmes avantages que le soudage avec préchauffage. Il est, en outre, utilisé pour le soudage des alliages légers, dans le but d'améliorer l'accostage, d'assurer une surface de contact suffisante et régulière avant le passage du courant de soudage de forte intensité.

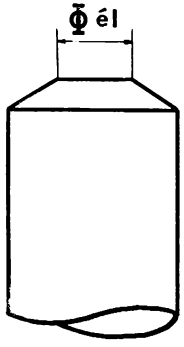


Fig. 58
Electrode à pointe tronconique.

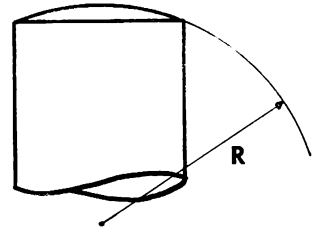


Fig. 59
Electrode à pointe sphérique.

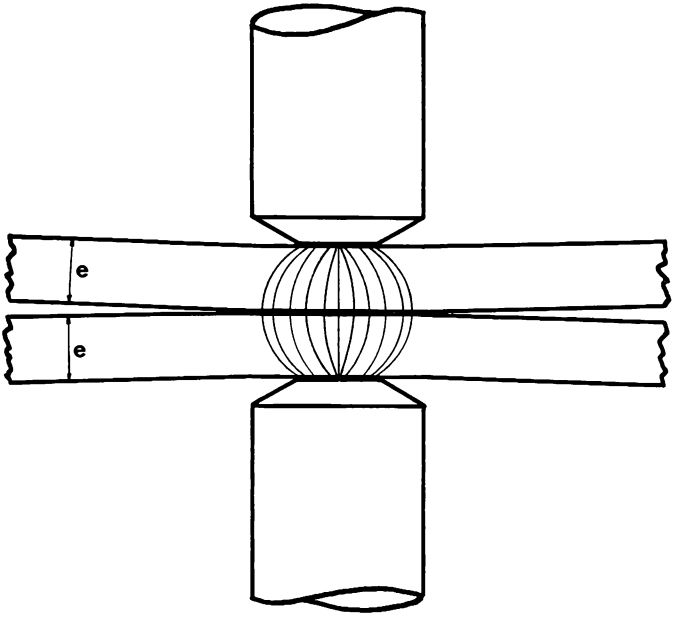


Fig. 60
Distribution des filets de courant dans les tôles.

DIMENSIONS DES POINTES D'ÉLECTRODES

En fait, la section et la forme des pointes d'électrode délimitent la surface par laquelle le courant de soudage passe de l'électrode aux pièces à assembler.

Les pointes d'électrode sont généralement de forme tronconique (voir fig. 58).

Il existe une différence entre le développement du point soudé dans les tôles épaisses et dans les tôles fines.

Ce phénomène est constaté expérimentalement.

Pour les tôles de faible épaisseur, la valeur constante à laquelle se fixe le diamètre du point dans la partie des courbes au-delà du genou B (voir fig. 50 et 51) est à peu près égale à 1,3 fois le diamètre de la pointe de l'électrode quelle que soit l'intensité du courant et quel que soit le diamètre de la pointe d'électrode.

Pour les tôles de forte épaisseur, la valeur constante à laquelle aboutit le diamètre du point soudé dans la partie des courbes située au-delà de B n'est pas toujours égale à 1,3 fois le diamètre de la pointe des électrodes. Ceci n'est vrai que lorsque la section de la pointe de l'électrode exprimée en millimètres carrés devient égale ou supérieure à 16 ou 17 fois l'épaisseur totale des tôles à souder, cette épaisseur étant exprimée en millimètres.

Ce phénomène s'explique de la façon suivante : pour les tôles épaisses, les filets de courant ont d'autant plus tendance à s'étaler dans les tôles que le diamètre de la pointe est petit (voir fig. 60).

La tendance à l'étalement des filets de courant donne lieu à une variation de la densité de courant dans les tôles; cette densité devient maximum sous les électrodes et minimum à l'endroit du joint, ce qui est l'inverse du but poursuivi.

En vertu des constatations expérimentales, cet inconvénient sera fortement réduit en adoptant pour la section de la pointe d'électrode (en mm^2) une valeur au moins égale à 16 ou 17 fois l'épaisseur totale des tôles (en mm).

D'où la formule qui lie le diamètre Φ électrode minimum à l'épaisseur des tôles à souder :

$$\frac{\pi \times \Phi^2 \text{ él}}{4} = 16 \times \Sigma e$$

d'où

$$\Phi \text{ él} = 4{,}5 \times \sqrt{\Sigma e}.$$

Si les tôles sont de même épaisseur,

$$\Phi \text{ él} = 6{,}4 \times \sqrt{e}.$$

La formule pour la détermination du diamètre de la pointe d'électrode, préconisée par l'« American Welding Society », est :

$$\Phi \text{ él} = 2e + 2{,}5 \text{ (en mm)}.$$

La formule préconisée par la « British Standard » est la suivante :

$$\Phi \text{ él} = \sqrt{e} \text{ (en pouces).}$$

Toutes ces formules conduisent à des valeurs sensiblement identiques.

On utilise également des électrodes à pointe sphérique (voir fig. 59). Ce type d'électrode à pointe sphérique ou bombée présente de nombreux avantages :

— Meilleur accostage — réglage plus aisé.

L'alignement des électrodes est moins important que pour les électrodes tronconiques qui exigent un réglage parfait. Les déformations de la machine ont moins d'influence sur la qualité et l'aspect du point.

— Empreintes extérieures moins marquées à l'endroit du point — plus bel aspect en surface.

— Adaptation d'un rayon de bombage à plusieurs épaisseurs, suivant la valeur de l'effort de compression.

— Meilleur refroidissement des pointes d'électrode.

Le tableau ci-dessous donne le diamètre et le rayon des pointes d'électrodes en fonction de l'épaisseur à souder.

Epaisseur E de la tôle (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8
Diamètre de la pointe d'électrode (mm)	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	18,5
Rayon de bombage R (mm) de la pointe d'électrode	50	75	75	100	100	150	200	200

EFFORT DE COMPRESSION AUX ÉLECTRODES

Comme il a été étudié dans un chapitre précédent, le rôle de l'effort de compression sur les pièces à souder est important pendant :

— l'accostage, ou temps de mise en pression des pièces avant soudage;

— le soudage proprement dit ou temps de passage du courant;

— le maintien ou temps pendant lequel le point de soudure reste sous pression après l'interruption du courant de soudage.

Il faut donc choisir une valeur :

— pour le temps d'accostage et le temps de maintien et une valeur pour l'effort de compression pendant l'accostage, le soudage et le maintien.

L'effort de compression, pendant l'accostage, doit être suffisant pour assurer une surface de passage de courant bien localisée, assurer une résistance de contact entre tôles suffisamment élevée et régulière, et une résistance de contact électrode-tôle la plus faible possible.

Nous avons vu que les valeurs des résistances de contact dépendaient fortement de l'effort de compression.

Pour faciliter le chauffage initial, un effort de compression faible serait souhaitable pour assurer une résistance de contact entre tôles très élevée, mais dans ces conditions la résistance de contact électrode-tôle aurait également une valeur relativement élevée, et même dangereuse qui pourrait donner lieu à un foyer d'échauffement au point de contact de chaque électrode.

D'où déformation et usure importante des électrodes, projections en surface et détérioration des pièces mêmes. Ces derniers inconvénients imposent une limite inférieure de l'effort de compression qu'il faudra toujours dépasser afin que les résistances de contact électrode-tôle soient le plus faible possible pendant toute la durée de l'opération.

Quand le noyau de soudure est en fusion, la résistance de contact entre tôles devient nulle. A ce moment, l'effort de compression peut être augmenté et conserver une valeur plus élevée jusqu'à la fin du forgeage.

Dès que la résistance de contact entre tôles est annulée, l'effort de compression doit s'opposer à la tendance du métal en fusion à sortir de son creuset plastique (phénomène de projection).

Pendant la période d'accostage et les premiers instants du passage du courant, la limite supérieure pour l'effort de compression sera assignée par la valeur correcte suffisamment forte que doit présenter la résistance de contact entre tôles. En effet, pour une intensité de courant et un temps de soudage donnés, des pointes d'électrode déterminées, le diamètre du point soudé diminue avec l'augmentation de l'effort de compression.

La figure 61 donne la courbe de diminution du diamètre du point en fonction de l'augmentation de l'effort de compression, en soudage, de deux tôles en acier doux, de 1 mm d'épaisseur.

L'intensité du courant de soudage est de 9 000 A. Le temps de soudage est de 6 périodes. Electrodes à pointe sphérique rayon 75 mm.

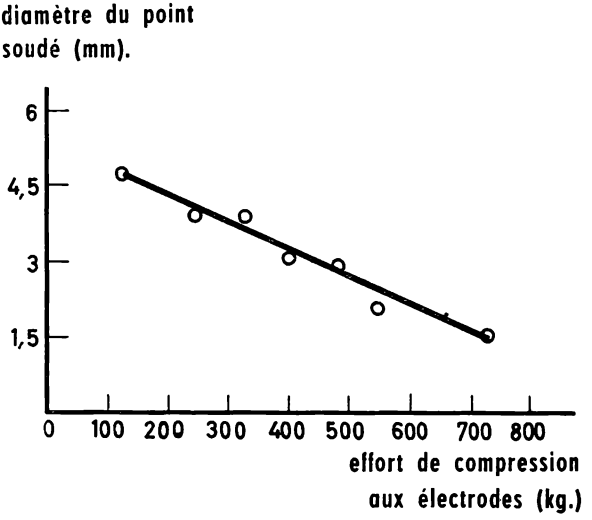


Fig. 61

L'effort de compression à admettre dépendra :

— des caractéristiques électriques et mécaniques des matériaux;
— des valeurs des résistances de contact (fonction de l'effort de compression);
— des épaisseurs des pièces à assembler;
— des conditions d'accostage des pièces : pièces planes, pièces embouties, profilés, pièces déformées.
Des pièces embouties exigeront un effort de compression supérieur à celui qui suffit pour des pièces planes. Elles offrent plus de résistance à la déformation;
— des états de surface qui conditionnent les valeurs des résistances de contact.
Des matériaux calaminés, par exemple, ont des résistances de contact très supérieures à celles des matériaux propres. Ils nécessiteront des efforts de compression plus élevés;
— de l'intensité du courant de soudage ou plus exactement de la densité de courant de soudage.
La pression par unité de surface de contact des électrodes sur les pièces, devra être d'autant plus forte que la densité de courant est élevée, pour éviter le phénomène de projection de métal en fusion.

La courbe, figure 62, donne les pressions spécifiques limites en fonction des densités de courant de soudage pour lesquelles le phénomène de projections n'a pas lieu. Il s'agit du soudage de tôles en acier doux propre, épaisseur 1 mm — électrodes à pointe tronconique, diamètre 5 mm — temps de soudage : 9 périodes.

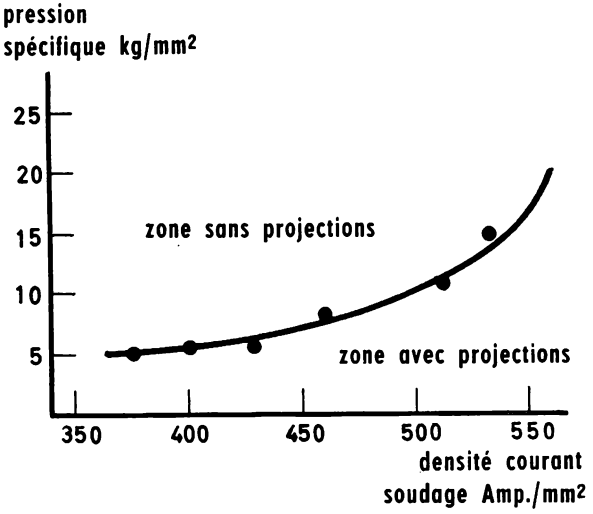


Fig. 62

L'effort de compression sera donc fonction du diamètre des pointes.

Pour toutes ces raisons, parfois contradictoires, il est difficile de donner des valeurs intangibles aux pressions spécifiques de soudage en fonction des matériaux.

Pour pièces s'accostant bien, on peut prendre comme base les valeurs suivantes de pression spécifique de soudage par millimètre carré de section de point de soudure :

Acier doux propre : 7 à 12 kg/mm²;

Acier inoxydable 18/8 : 13 à 25 kg/mm²;

Aluminium et alliages d'aluminium : 8 à 25 kg/mm².

Ces valeurs de base sont assez imprécises, elles dépendent tellement des conditions de soudage et de la classe de soudure exigée. Si un cycle avec variation de pression est utilisé, la pression spécifique de forgeage est généralement égale à deux fois la pression spécifique de soudage.

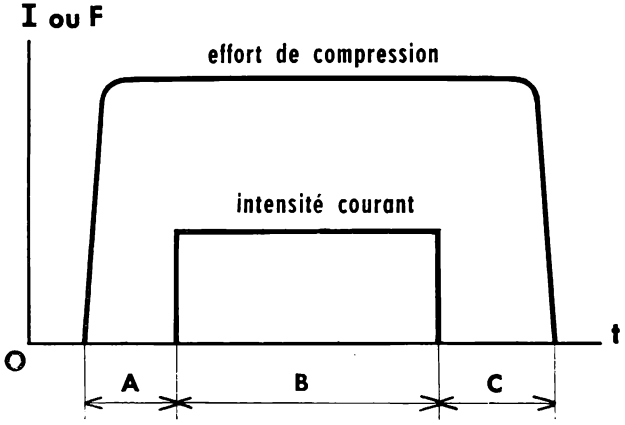


Fig. 63
Soudage avec effort de compression constant.

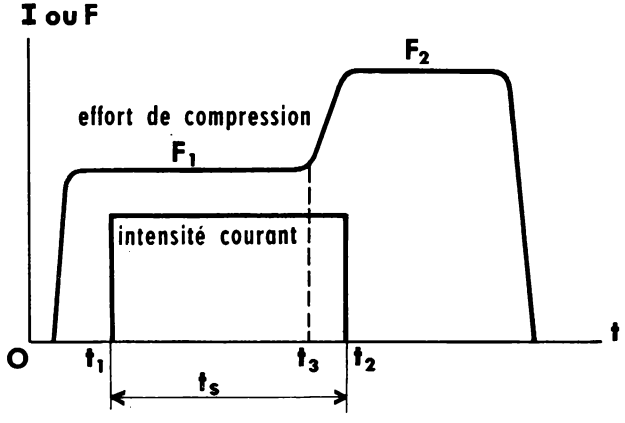


Fig. 64
Soudage avec variation de l'effort de compression pendant le soudage.

LES DIFFÉRENTS CYCLES D'EFFORT DE COMPRESSION.

Soudage avec effort de compression constant.

Il est utilisé dans la grande majorité des cas (voir fig. 63). On adopte une valeur de l'effort de compression constante pendant toute la durée de l'opération : accostage, soudage (chauffage) et maintien.

L'influence du temps de maintien a été étudiée. Généralement, le temps de maintien devra être d'autant plus long que l'épaisseur des pièces est forte et que les conditions d'accostage sont mauvaises.

Dans les cas normaux, le temps de maintien variera de 5 périodes pour les épaisseurs de 1 mm, à 50 ou 100 périodes pour les épaisseurs de 5 mm.

Pour certains cas de soudage en grande cadence, les temps de maintien sont fortement réduits.

Pour certains aciers spéciaux, certains alliages d'aluminium, les aciers à teneur en carbone élevée, le temps de maintien est réduit afin de diminuer l'effet de trempe, et la formation de criques dans le point.

Soudage avec variation de l'effort de compression.

Ce procédé est caractérisé par l'augmentation rapide de l'effort de compression en fin de soudage. Cette variation de l'effort de compression est provoquée au moment de l'interruption du courant de soudage, ou quelques périodes avant l'interruption du courant de soudage (voir fig. 64).

Cet effort de compression ainsi augmenté se prolonge pendant le temps de maintien et s'appelle le forgeage. Ce procédé améliore fortement les qualités du point soudé : augmentation de la résistance mécanique, amélioration des qualités métallurgiques du point.

Il présente l'avantage d'adapter la valeur de l'effort aux phases de l'opération de soudage.

Relativement faible pendant les premiers temps du chauffage, l'effort de compression assure une valeur de résistance de contact entre tôles suffisamment élevée. Fortement augmenté, quand la résistance de contact est nulle, l'effort de compression n'influence plus l'échauffement, mais sa valeur élevée est très favorable à la suppression des projections qui ont tendance à se produire, et exerce son action bienfaisante sur les phénomènes qui ont lieu pendant la solidification du point (voir page 57 « Aspect métallurgique du soudage par points »).

Le soudage avec forgeage offre de grands avantages pour l'assemblage de fortes épaisseurs en acier doux, des alliages d'aluminium. Dans ces cas, il est indispensable si les exigences de qualité de soudure sont sévères. La valeur de l'effort de forgeage est égale à environ une fois et demi à deux fois la valeur de l'effort de soudage.

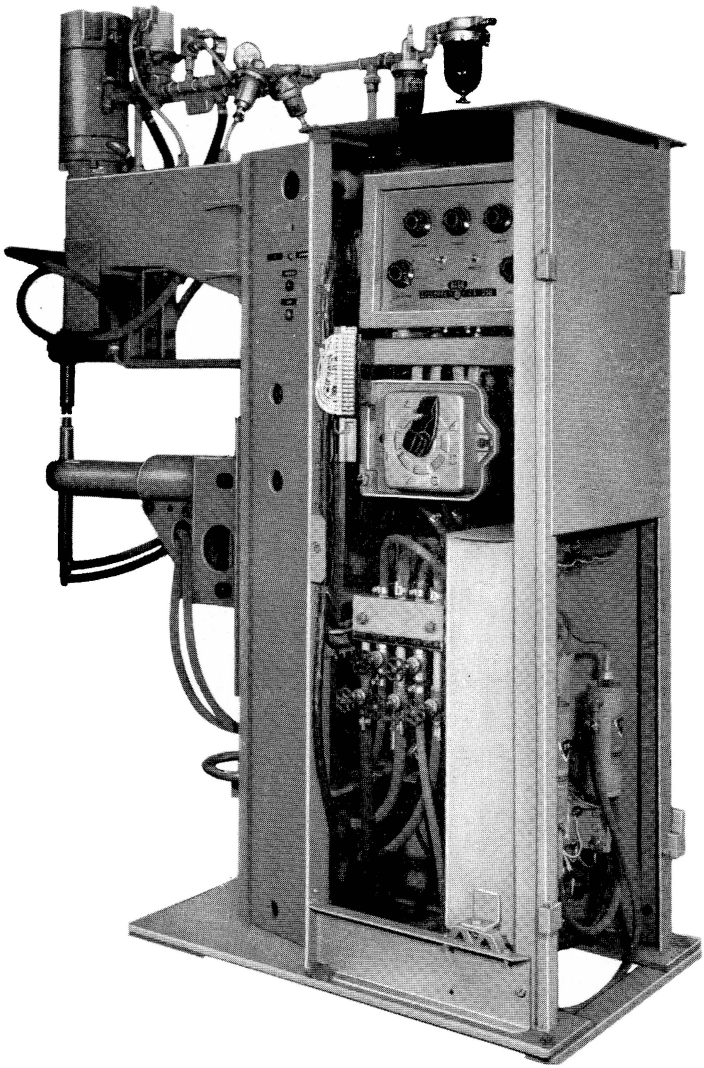


Fig. 65

Machine à souder par points, à commande pneumatique.

LES MACHINES A SOUDER PAR POINTS

CLASSIFICATION

Les machines à souder par points peuvent se classer en deux grandes catégories :

— Les machines fixes : simples, double point, à points multiples.

— Les machines mobiles : postes à pince de soudage, postes à pistolet de soudage, têtes de soudage mobiles avec ou sans transformateur incorporé.

Dans le cas des machines fixes, les pièces à assembler sont amenées à la machine à souder, et déplacées après la réalisation de chaque point de soudure.

Dans le cas des machines mobiles, les pièces à souder sont fixes et la machine à souder est déplacée pour réaliser les points de soudure aux endroits voulus.

Les machines à souder peuvent également se distinguer et se caractériser :

— par le système de mise en pression des électrodes;

— par le type d'alimentation électrique de puissance : monophasé ou triphasé;

— par la disposition du circuit électrique de soudage,

— par le courant de soudage : alternatif, basse fréquence, continu ou redressé;

— d'après la cadence de soudage : par point simple, à la volée, faible ou grande cadence.

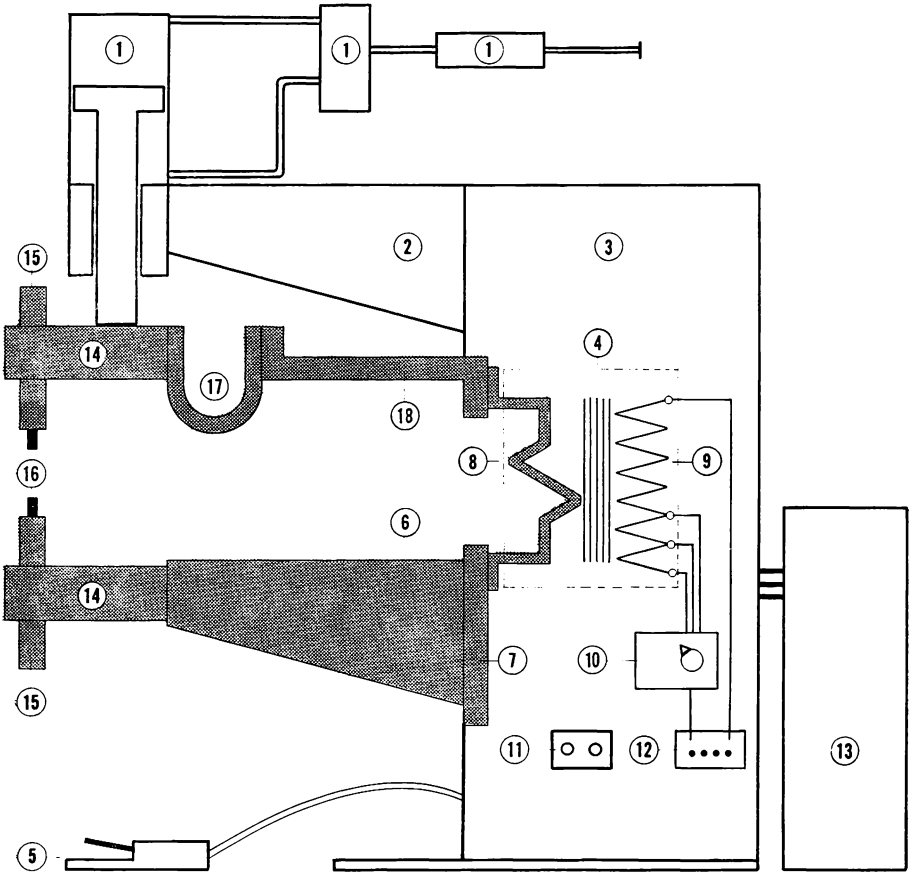


Fig. 66

Représentation schématique d'une machine à souder par points fixe.

1. Dispositif de mise en pression des électrodes (cylindre pneumatique, par exemple);
2. Bras supérieur;
3. Bâti;
4. Transformateur de soudage;
5. Pédale de commande;
6. Bras inférieur conducteur;
7. Tablier de fixation du bras inférieur.
8. Secondaire du transformateur;
9. Primaire du transformateur;
10. Commutateur de réglage de puissance;
11. Alimentation en air comprimé;
12. Plaques à bornes de raccordement électrique;
13. Appareillage électrique et armoire électronique;
14. Support de porte-électrode;
15. Porte-électrode;
16. Electrodes;
17. Conducteur supérieur flexible;
18. Conducteur supérieur rigide.

ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX D'UNE MACHINE A SOUDER PAR POINTS

(voir fig. 66)

Les parties principales constituant une machine à souder par points sont :

- le bâti;
- le transformateur de soudage destiné à fournir aux pièces à souder le courant de soudage;
- le circuit secondaire extérieur destiné à amener le courant de soudage du transformateur aux porte-électrode et électrodes en contact avec les pièces à souder;
- les porte-électrode et électrodes;
- un système de mise en mouvement et en pression des électrodes, destiné à fournir l'effort de compression localisé sur les pièces à souder;
- un système de refroidissement des organes sujets à échauffement pendant le passage du courant;
- un appareillage électrique et éventuellement électronique ayant les rôles suivants :

  enclencher et couper le courant de soudage;
  compter le temps de soudage ou plus généralement les temps d'accostage, de soudage, de maintien, d'intervalle, de préchauffe, de recuit, etc.;
  régler le courant de soudage, de préchauffe, de recuit;
  assurer l'automatisation partielle ou complète de l'opération de soudage.

LE BATI

Les bâtis des machines à souder par points de construction moderne sont réalisés au moyen de tôles pliées et de profilés laminés à chaud assemblés par soudage à l'arc.

Quelques rares constructeurs s'en tiennent encore aux bâtis en fonte, mais cette conception est révolue et pratiquement périmée.

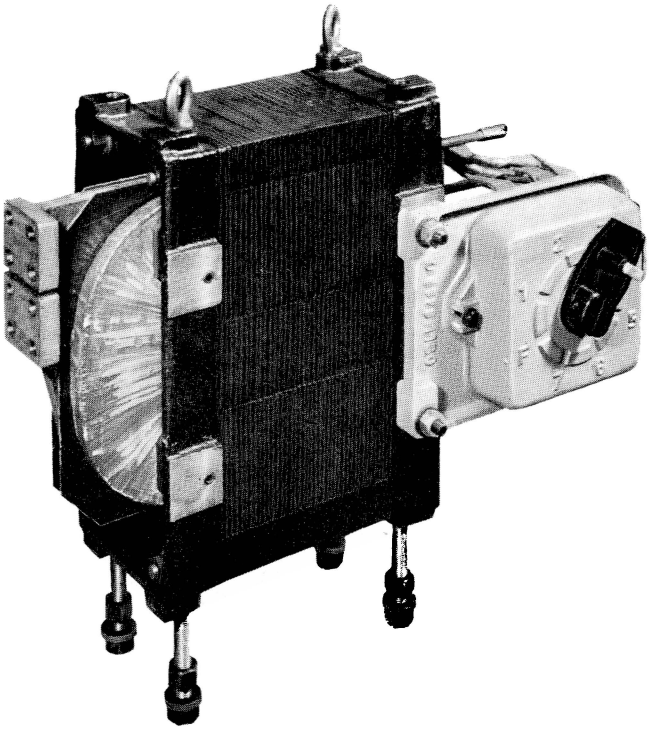


Fig. 67
Transformateur complet, avec commutateur.

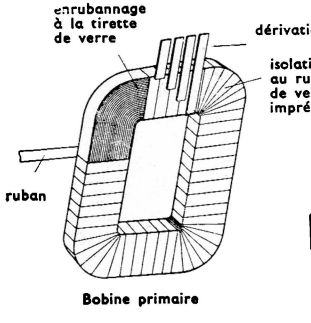


Fig. 68
Bobine primaire.

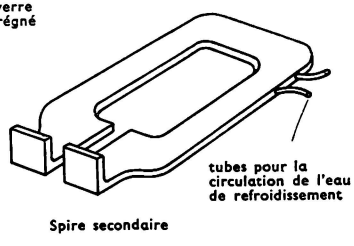


Fig. 69
Spire secondaire.

LE TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ

Il fournit l'énergie électrique nécessaire à la fusion du point de soudure.

Nous ne considérons ici que le type de transformateur, monophasé alternatif qui est le plus souvent utilisé dans les machines à souder par points (voir fig. 67).

DESCRIPTION

Le rôle du transformateur consiste à transformer une tension primaire de ligne en une tension secondaire de valeur plus faible adaptée au but voulu.

Comme un transformateur statique normal, il comprend :

un circuit électrique primaire,

un circuit électrique secondaire,

un circuit magnétique.

Le circuit électrique primaire est constitué par un certain nombre de bobines connectées entre elles en série ou en parallèle.

Les conducteurs utilisés sont le fil et plus généralement le méplat en cuivre avec bords arrondis. La largeur des méplats ne dépasse généralement pas 20 mm afin de limiter les pertes par courants de Foucault. Leur épaisseur excède rarement 2,5 mm.

Deux ou plusieurs conducteurs sont mis en parallèle si une plus grande section de passage est nécessaire.

Habituellement, un ruban isolant est intercalé entre les spires en méplat.

La bobine est alors enrubannée complètement d'un isolant. La figure 68 représente une bobine primaire (spires en méplat cuivre).

Le secondaire comporte généralement une seule spire, ou plusieurs spires raccordées en série ou en parallèle et formant un ou deux tours seulement; c'est là une particularité propre aux transformateurs de machines à souder par résistance (fig. 69).

La spire secondaire est habituellement en cuivre coulé, bon conducteur et de forte section.

La force électromotrice secondaire varie de quelques dixièmes de volt à environ 30 volts pour les postes à pinces.

Elle dépend de la valeur du courant de soudage à obtenir, des dimensions du circuit secondaire extérieur, etc. La valeur du courant secondaire varie de quelques milliers d'ampères pour les petites machines à souder à 100 000 A et plus, pour les machines à souder destinées au soudage de fortes épaisseurs et des alliages légers. Il est à conseiller de sandwicher les spires secondaires entre les bobines primaires.

Les spires secondaires sont refroidies par circulation d'eau. A cet effet, un tube de circulation d'eau est soudé à l'étain sur le secondaire même ou incorporé lors de la coulée (voir fig. 69).

Les deux extrémités ou bornes de la spire secondaire sont pourvues de trous taraudés qui servent à son raccordement au circuit secondaire extérieur.

Le circuit magnétique est généralement du type cuirassé et constitué de tôles au silicium à faibles pertes par hystérésis.

Contrairement aux transformateurs de puissance, la mise sous tension des transformateurs de machine à souder est très intermittente et dans ce cas, il est permis d'adopter des inductions assez élevées en veillant cependant à ce que le courant magnétisant ne soit pas trop important.

L'emploi de tôles magnétiques à grains orientés ne présente donc pas les avantages constatés avec les transformateurs de puissance, puisque l'économie des pertes ne se fait que pendant un pourcentage très faible du temps.

De plus, comme on a coutume d'utiliser de fortes inductions (16 000 gauss ou plus) le nombre d'ampères-tours par cm est sensiblement le même pour des tôles à grains orientés que pour des tôles normales (voir fig. 70).

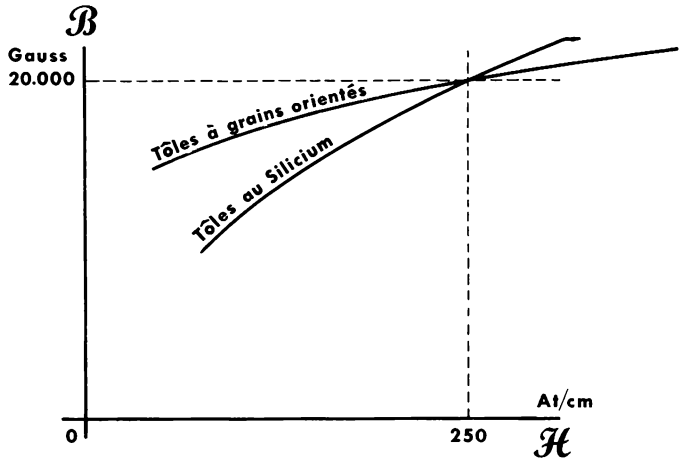


Fig. 70

RÉGLAGE DE LA PUISSANCE.

Le réglage de la puissance électrique d'une machine à souder pour l'adapter à chaque cas particulier s'obtient :

soit en faisant varier la tension secondaire;

soit dans le cas des commandes électroniques, par déphasage du point d'allumage de chaque tube ignitron. Ce dernier mode de réglage électronique sera étudié ultérieurement.

Le réglage de puissance par variation de la tension secondaire peut se réaliser de différentes façons :

Réglage de la puissance électrique par résistance.

Une résistance réglable est connectée en série sur le primaire du transformateur (voir fig. 71) et permet ainsi de faire varier la tension aux bornes directes du transformateur.

Cette solution n'est utilisée que dans certains cas de machines de très faibles puissances.

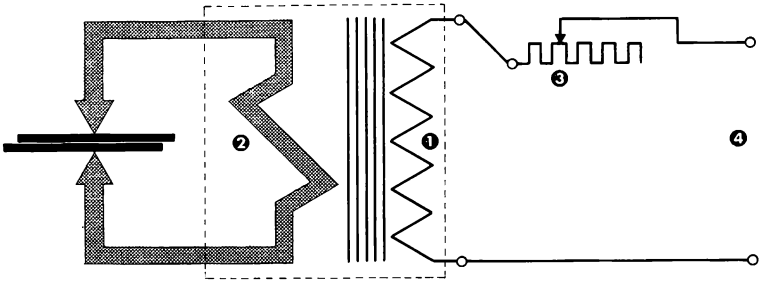


Fig. 71

Réglage de la puissance électrique par résistance réglable :

1. Primaire du transformateur;
2. Secondaire du transformateur;
3. Résistance de réglage;
4. Réseau d'alimentation.

Réglage de la puissance par couplage série parallèle du secondaire.

Dans ce cas, le secondaire se compose de deux spires qu'il est possible de coupler en série ou en parallèle. Ce système permet l'obtention de tensions secondaires très différentes.

Réglage de la puissance par variation du nombre de spires primaires.

C'est ce système qui est adopté dans la majorité des machines à souder par résistance.

Des prises intermédiaires sont prévues en divers endroits d'une ou de plusieurs bobines, correspondant à des nombres de spires déterminés.

Ces prises sortent des enroulements pour être raccordées à un commutateur de réglage. La figure 68 donne le dessin d'une bobine avec ses diverses sorties.

Soit : n_1 = nombre de spires primaires;
n_2 = nombre de spires secondaires;
k = rapport de transformation;

$$k = \frac{n_1}{n_2} \quad k = n_1 \text{ si } n_2 = 1.$$

U_s = tension secondaire à vide;
U_p = tension d'alimentation de ligne;
on a, sans tenir compte des pertes,

$$U_s = \frac{U_p}{k} = \frac{U_p}{n_1}.$$

U_p étant une constante, cette relation montre qu'une diminution du nombre de spires primaires correspond à une augmentation de la valeur de la tension secondaire.

Le nombre de plots de réglage est variable suivant le constructeur et le type de machine. Il varie de 2 à 10 plots et même plus.

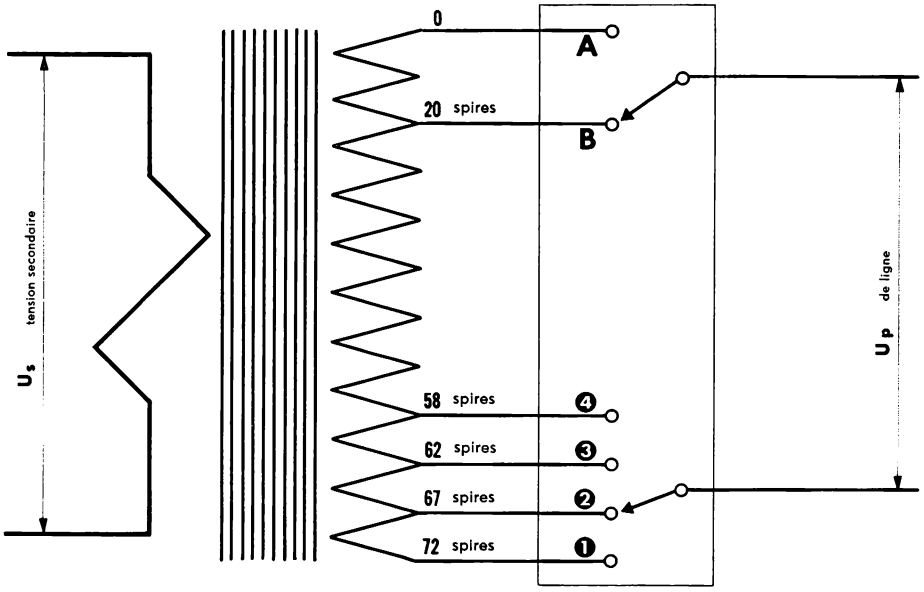


Fig. 72
Transformateur avec son dispositif de réglage de puissance.

La figure 72 représente schématiquement un transformateur avec son dispositif de réglage avec prises en deux endroits différents donnant deux gammes de tensions secondaires :

A.1	A.2	A.3	A.4
B.1	B.2	B.3	B.4

Si la tension de ligne prévue est de 380 volts, les tensions secondaires à vide seront les suivantes si le secondaire comporte deux spires couplées en parallèle.

Plot	$k = n_1$	U_s volts
A.1	72	5,3
A.2	67	5,7
A.3	62	6,1
A.4	58	6,5
B.1	52	7,3
B.2	47	8,1
B.3	42	9
B.4	38	10

Le tableau ci-dessous donne à titre d'exemple les caractéristiques d'une machine à souder fixe, bras de 600 mm de longueur équipée d'un transformateur de 50 kVA au facteur de marche de 50 % (quatre bobines primaires, deux spires secondaires couplées en parallèle) 7 plots : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7.

Plot	U_s volts à vide	Intensité du courant secondaire ampères
1	3,65	14 000
2	4	15 000
3	4,45	16 500
4	4,9	18 300
5	5,35	20 000
6	5,93	22 000
7	6,4	24 000

Comme figuré au croquis (fig. 72) les diverses prises du transformateur sont raccordées à un commutateur de manœuvre qui servira à régler la tension secondaire.

Il existe plusieurs types de commutateur dont les principaux sont :

le commutateur à fiches (fig. 73),

le commutateur rotatif (fig. 74),

le commutateur à barrettes fixées par vis ou écrous.

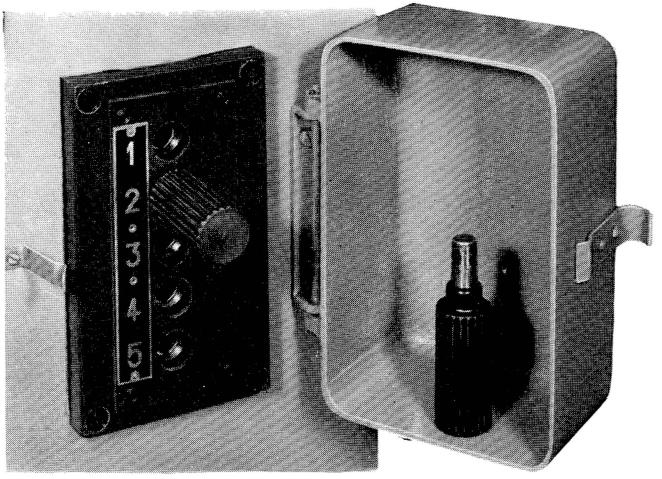


Fig. 73
Commutateur à fiches.

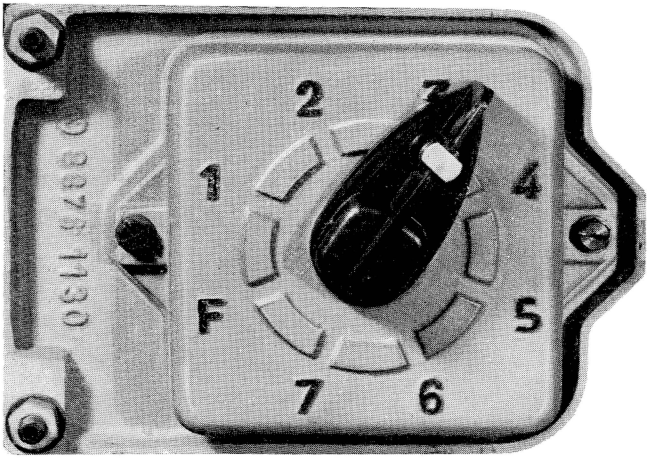


Fig. 74
Commutateur rotatif.

LE CIRCUIT SECONDAIRE EXTÉRIEUR.

A la figure 66, page 92, on peut voir la disposition schématique du circuit secondaire extérieur.

Il conduit le courant de soudage des terminaisons du secondaire du transformateur aux électrodes. Il se compose de conducteurs rigides et flexibles en cuivre, bronze ou laiton, alliages de cuivre divers, et alliages d'aluminium.

La force électromotrice induite dans le secondaire sert donc à faire circuler le courant de soudage dans le circuit extérieur dans lequel se trouvent les pièces à souder insérées entre les éléctrodes.

L'intensité du courant de soudage dépendra de la tension secondaire, de l'impédance de ou des spires secondaires, de l'impédance du circuit secondaire extérieur.

$$I_s = \frac{E_s}{Z};$$

$$Z = \sqrt{(R_s + R_e)^2 + (\omega \cdot L_s + \omega \cdot L_e)^2}$$

E_s = tension secondaire (f.e.m.);
I_s = intensité du courant secondaire de soudage;
Z = impédance totale du circuit secondaire;
R_s = résistance ohmique des spires du secondaire;
ωL_s = réactance d'induction du secondaire;
R_e = résistance ohmique du circuit secondaire extérieur;
ωL_e = réactance d'induction du circuit extérieur secondaire;
$\omega = 2 \pi f$. (f : fréquence).

On peut encore dire que :

$$I_s = \frac{U_e}{\sqrt{R_e^2 + (\omega \cdot L_e)^2}}$$

en appelant U_e la tension aux bornes du secondaire ou du circuit secondaire extérieur.

On voit donc que l'intensité du courant de soudage dépendra des caractéristiques propres du transformateur et des caractéristiques du circuit extérieur : de la résistance ohmique et de la réactance d'induction, ainsi que de la résistance des pièces à souder insérées entre les électrodes.

La résistance des divers éléments constitutifs du circuit extérieur est fonction de leurs section et longueur, du matériau utilisé et de la fréquence du courant en raison de l'effet pelliculaire.

Il faut en effet tenir compte de l'effet pelliculaire à cause de la forte section des conducteurs composant ce circuit. La réactance d'induction du circuit extérieur, qui forme en fait une spire, dépendra de la longueur des conducteurs inférieur et supérieur et de leur écartement, des masses magnétiques insérées entre les bras ou se trouvant à proximité du circuit secondaire.

Dans le cas des machines monophasées avec tension d'alimentation de fréquence normale, l'étendue de la surface englobée par le circuit secondaire extérieur influence fortement l'intensité du courant secondaire.

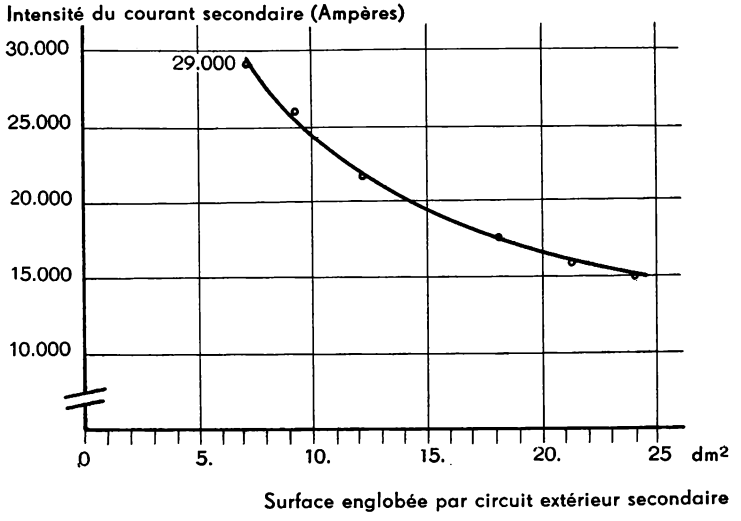


Fig. 75

Graphique des variations du courant secondaire en fonction de l'écartement entre conducteurs supérieur et inférieur du circuit secondaire extérieur.

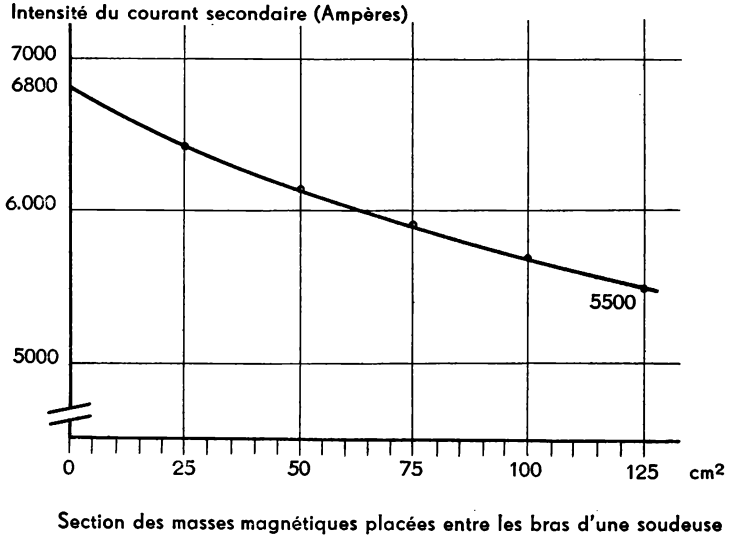


Fig. 76

Graphique des variations de l'intensité du courant secondaire en fonction des masses magnétiques placées entre conducteurs supérieur et inférieur du circuit secondaire extérieur.

La figure 75 donne le graphique de l'intensité du courant de soudage en fonction de la surface formée par les conducteurs secondaires (conducteurs, bras, porte-électrode, électrodes). Il s'agit d'une machine à souder fixe à bras de 600 mm de longueur (voir fig. 77), équipée d'un transformateur de 80 kVA au facteur de marche de 50 %.

Le graphique (fig. 76) donne la variation de l'intensité secondaire en fonction de la section des masses magnétiques placées entre les bras d'une machine à souder de faible puissance.

Ces considérations montrent :

— qu'un réglage de soudage établi pour une position des bras déterminée peut ne plus être valable si la position des bras est modifiée;

— qu'il y a toujours intérêt à utiliser des machines à bras courts et avec le plus faible écartement;

— que le fait de souder des pièces massives introduites à l'extérieur des bras peut influencer le réglage.

PUISSANCE ÉLECTRIQUE DES MACHINES A SOUDER PAR RÉSISTANCE ALIMENTÉES EN COURANT MONOPHASÉ.

La Puissance Apparente absorbée par une machine à souder est donnée par la relation :

$$P_{app} = U.I. \text{ (en V.A.)}$$

U = tension aux bornes de la machine à souder, en volts;

I = intensité du courant d'alimentation primaire en ampères;

U et I en valeurs efficaces.

$$P_{app} = \frac{UI}{1\,000} \text{ kVA.}$$

La Puissance Active est donnée par la relation :

$$P_{act} = U.I. \cos. \varphi \quad \text{Watts}$$

$$P_{act} = \frac{U.I. \cos \varphi}{1\,000} \quad \text{kW.}$$

La Puissance Réactive est donnée par la relation :

$$P_r = U.I. \sin. \varphi \quad \text{VAr}$$

La puissance des machines à souder par résistance s'exprime généralement en kVA (puissance apparente).

La puissance d'une machine à souder dépend de la puissance du transformateur même et de l'impédance du circuit secondaire extérieur (longueur et écartement des bras, nature et section des conducteurs).

La puissance apparente absorbée par une machine à souder ne reflète pas sa capacité de soudage, car pour une même puissance, l'intensité du courant secondaire de soudage peut varier dans de fortes proportions.

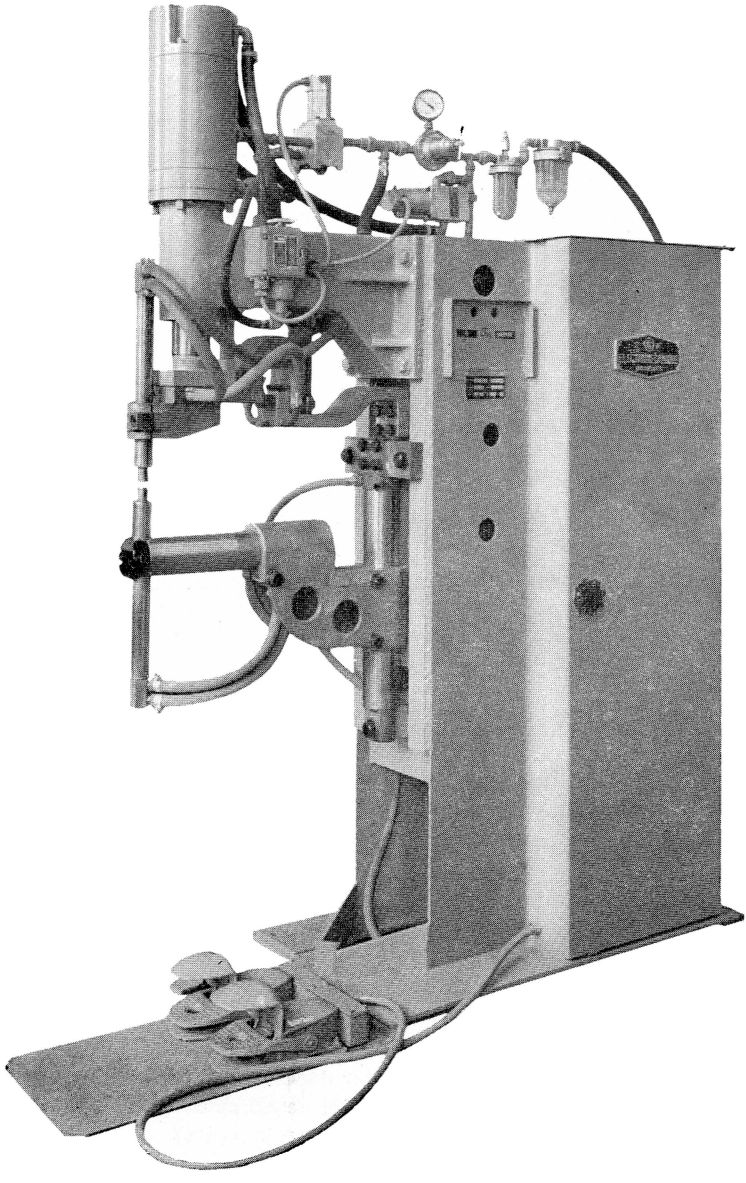


Fig. 77
Machine à souder au point; longueur de bras : 600 mm

« L'Organisation Internationale de Normalisation » (Comité technique — ISO/TC 44 « Soudure ») a établi des normes et des recommandations concernant les puissances des machines à souder. Ces spécifications sont reprises ci-après.

RECOMMANDATION ISO

(avant-projet)

SPÉCIFICATION DU MATÉRIEL DE SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

Section I : **GÉNÉRALITÉS.**

Domaine d'application :

Ces recommandations sont applicables aux machines à souder par résistance alimentées en courant monophasé, y compris les machines mobiles pour autant qu'elles soient complètes. Elles ne sont pas applicables à des transformateurs fournis séparément. Ces recommandations sont valables dans les conditions suivantes : elles concernent provisoirement les machines dont la puissance conventionnelle ne dépasse pas 400 kVA.

a) Altitude : En l'absence d'indication concernant l'altitude au-dessus du niveau de la mer à laquelle le matériel est destiné à fonctionner en service normal, cette altitude est supposée ne pas dépasser 1 000 m.

b) Température du milieu de refroidissement : En l'absence d'indication contraire, il est supposé que la température maximum de l'eau de refroidissement ne dépasse pas 25 °C à l'entrée des machines et que, dans le cas d'appareils refroidis à l'air, aucune des températures limites suivantes n'est dépassée :

température maximum de l'air ambiant : 40 °C;
température moyenne journalière de l'air : 30 °C;
température moyenne annuelle de l'air : 20 °C.

c) Pression de l'eau de refroidissement : En l'absence d'indication contraire, il est entendu que la pression d'eau de refroidissement sera au moins égale à celle pour laquelle l'appareil a été prévu.

Définitions.

a) *Régime* : Ensemble des grandeurs caractérisant le fonctionnement d'une machine.

b) *Nominal* : Qualification d'une grandeur qui figure dans la désignation d'une machine à souder par résistance.

c) *Service* : Stipulation des régimes auxquels la machine ou l'appareil est soumis, de leurs durées respectives et de leur ordre de succession dans le temps.

d) *Service périodique* : Service à régime variable se reproduisant périodiquement.

e) *Facteur de marche* : Rapport de la durée de fonctionnement en charge à la durée du cycle complet. Ce rapport compris entre 0 et 1 peut s'exprimer en pour cent.

Note 1 : L'expression « duty cycle » a la même signification que l'expression « duty factor » utilisée dans le vocabulaire électrotechnique international.

Note 2 : Dans les présentes recommandations, le mot « charge » doit être pris dans un sens restrictif; il s'agit d'une charge constante à l'exclusion de toute période de préchauffage ou de postchauffage en régime constant ou variable.

f) *Puissance maximum de court-circuit* : Puissance maximum apparente aux bornes de la machine exprimée en kVA, absorbée au réglage le plus élevé, les électrodes étant court-circuitées dans les conditions précisées dans les méthodes d'essai et la machine réglée de façon à avoir le minimum d'impédance compatible avec le mode de court-circuit précisé.

g) *Puissance maximum de soudage* : La puissance maximum de soudage est égale aux 8/10 de la puissance maximum de court-circuit.

h) *Puissance conventionnelle au facteur de marche de* 50 % : Puissance apparente, exprimée en kVA, correspondant à un service continu, réel ou fictif au facteur de marche de 50 % pour le réglage le plus élevé sans dépasser les limites d'échauffement spécifiées (voir « Limites d'échauffement ») lorsque les essais sont effectués en accord avec les recommandations suivantes :

Conditions dans lesquelles les mesures de température doivent être effectuées :

a) *Transformateurs refroidis par air* :

L'essai peut être effectué à une température ambiante quelconque supérieure à + 10 °C. On considère que les échauffements demeurent les mêmes lorsque la température ambiante est comprise entre + 10 °C et + 40 °C. La température ambiante sera prise comme la moyenne de celles enregistrées durant le dernier quart de l'essai. Les échauffements seront déterminés dans le cas d'enroulements primaires soit par variation de résistance, soit par thermomètre ou dans le cas d'enroulements secondaires soit par variation de résistance, soit par indicateur interne de température à condition que, lorsqu'on utilise la méthode par thermomètre, la mesure soit effectuée au point le plus chaud accessible.

Les échauffements seront déterminés à la fin de la dernière période de mise en charge. Les températures les plus élevées enregistrées seront celles retenues.

b) *Transformateurs refroidis par eau* :

Les échauffements seront déterminés en tenant compte de la température réelle de l'eau à l'entrée de la machine au moment de l'essai. Par température de l'eau, on entend la moyenne des valeurs relevées au cours du dernier quart de l'essai.

Les échauffements sont déterminés soit par variation de résistance, soit à l'aide d'indicateurs internes de température dans le cas des enroulements primaires, soit à l'aide de thermomètres ou d'indicateurs internes de température dans le cas des enroulements secondaires.

Dans le cas d'utilisation de la méthode par variation de résistance, les températures sont mesurées après avoir arrêté la circulation de l'eau et supprimé la charge.

Les mesures de températures sont effectuées pas moins de 15 secondes et en tout cas, 60 secondes au plus après l'arrêt.

Lorsqu'on utilise des indicateurs internes de température, aussi bien pour la mesure des températures des enroulements primaires que pour celles des enroulements secondaires ou même lorsqu'on utilise des thermomètres pour mesurer la température des enroulements secondaires, les mesures doivent être effectuées en charge, l'eau de refroidissement étant en circulation. On retient finalement les températures maximales atteintes.

Limites d'échauffement.

Les limites d'échauffement pour les matériels refroidis à l'air et à l'eau sont celles indiquées dans le tableau ci-dessous :

Mode de refroidissement	Organe	Méthode de détermination	Classes d'isolants				
			A	E	B	F	H
			°C	°C	°C	°C	°C
AIR	Primaire	Résistance	60	75	85	105	130
		Thermomètre	55	70	80	100	120
	Secondaire	Thermomètre	55	70	80	100	120
		Indicateur interne ..	65	80	90	115	140
EAU	Primaire	Résistance	70	85	95	115	140
		Indicateur interne ..	75	90	100	125	150
	Secondaire	Thermomètre	65	80	90	110	135
		Indicateur interne ..	75	90	100	125	150

Note 1 : Les valeurs numériques données pour les classes F et H doivent être considérées comme provisoires et susceptibles d'être modifiées lorsqu'on disposera des résultats résultant d'une pratique confirmée.

Note 2 : Ces échauffements maxima pour les enroulements primaires ne sont valables que lorsqu'il existe un contact intime entre ces enroulements et les parties directement refroidies par l'eau.

Section 2 : **MÉTHODES D'ESSAIS.**

Détermination de la Puissance Maximum de Court-Circuit : *Pm.*

a) *Généralités* : Les essais doivent être effectués sur des machines à souder par résistance neuves. Lors de la détermination de la puissance maximum de court-circuit, la tension prévue pour l'alimentation du primaire de la machine doit être utilisée. La tension d'alimentation mesurée aux bornes de l'appareil en charge, ne doit pas s'écarter de + 5 % et de — 10 % de la tension nominale. La correction doit ensuite être faite par la règle de proportionnalité du courant à la tension.

b) *Modalités relatives à la mise en court-circuit.*

Machines à souder par point.

Le court-circuit sera réalisé en amenant les électrodes au contact et en respectant les conditions suivantes :

d : diamètre de la pointe d'électrode en mm;

F : effort maximum développé par la machine exprimé en kg;

$d = (0{,}5 \pm 0{,}05)\sqrt{F}$.

d ayant une valeur minimum égale à 2,5 mm.

Les pointes d'électrodes doivent être plates.

Les pointes d'électrodes sont constituées par un alliage ayant une conductivité au moins égale à 80 % de celle du cuivre type recuit international.

Note : La résistivité fixée par la « Commission Electrotechnique Internationale » sera prise comme valeur normale pour le cuivre type recuit :

A la température de 20 °C, la résistivité du cuivre, type recuit, est de 1/58 = 0,017241 ohm par mm² par mètre.

Détermination de la puissance au facteur de marche de 50 %.

La machine étant réglée et alimentée suivant les conditions énoncées dans les paragraphes précédents, on mesure la puissance primaire absorbée *Pm* comme indiquée et on détermine le facteur de marche correspondant X, exprimé en pourcentage, que peut supporter la machine sans dépasser les limites d'échauffement données; la puissance conventionnelle *Pc* au facteur de marche de 50 % se calcule par la formule suivante :

$$Pc = Pm \sqrt{\frac{x}{50}}.$$

Note des auteurs :

Cette relation découle du fait que pour un échauffement déterminé (par exemple l'échauffement maximum admissible) on peut écrire de façon générale :

$$R.\ I^2_{x_1} \times X_1\ \% = R.\ I^2_{x_2} \times X_2\ \%$$

$$I_{x1} = I_{x2} \times \sqrt{\frac{X_2}{X_1}}$$

d'où

$$P_{x1} = P_{x2} \times \sqrt{\frac{X_2}{X_1}}$$

X_1 et X_2 étant des facteurs de marche différents.

Le facteur de marche sera ajusté en prenant pour valeur de durée du cycle, 60 secondes ($t_1 + t_2$) et en augmentant le temps de passage du courant t_1 jusqu'à ce que l'échauffement maximum spécifié soit atteint. Si la valeur maximum t_1, qui peut être réalisée par la machine n'est pas suffisante pour produire cet échauffement admissible, alors t_1 sera laissé à cette valeur maximum et t_2 qui est le temps d'arrêt sera réduit jusqu'à ce que l'échauffement approprié soit atteint. Le facteur de marche X est calculé d'après la formule suivante :

$$X = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \cdot 100\ \%.$$

Dans le cas où la puissance disponible n'est pas suffisante pour essayer le matériel par la méthode décrite ci-dessus, la méthode suivante peut être utilisée après accord entre le fabricant et l'usager :

La tension primaire nominale doit être utilisée, la machine étant au réglage le plus élevé et le courant secondaire ajusté au moyen d'une impédance introduite dans le circuit secondaire.

La charge sera appliquée avec un facteur de marche d'au moins 50 % et avec un temps d'arrêt au plus égal à 30 secondes.

La puissance conventionnelle à ce facteur de marche de 50 % sera alors calculée comme suit :

$$Pc = Pm \cdot \sqrt{\frac{x}{50}}$$

formule dans laquelle :

Pm = puissance mesurée;

x = facteur de marche utilisé.

Lorsqu'on désire utiliser ces formules pour déterminer la puissance, et le facteur de marche correspondant à d'autres réglages, il y a lieu de tenir compte des remarques portées en annexe.

Détermination de la valeur efficace du courant maximum de court-circuit secondaire.

Le courant maximum de court-circuit secondaire doit être mesuré dans les mêmes conditions d'essais que celles utilisées pour la détermination de la puissance maximum de court-circuit et avec les mêmes méthodes de correction. Elle doit être exprimée comme valeur efficace du courant en ampère.

Provisoirement, une tolérance de ± 10 % sera admise sur la valeur du courant maximum de court-circuit en attendant que la technique de mesure puisse être améliorée.

Note : Le calcul du courant secondaire à partir du courant primaire en tenant compte du rapport de transformation (rapport des nombres de spires primaires et secondaires) peut conduire à une valeur trop élevée du courant secondaire.

Mesure des températures.

a) *Méthode par variation de résistance.*

Dans cette méthode, l'échauffement des enroulements est déterminé par accroissement de la résistance.

Pour les enroulements en cuivre, l'échauffement est obtenu par la formule :

$$\frac{t_2 + 235}{t_1 + 235} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Dans la pratique, il est commode de calculer l'échauffement par la formule équivalente suivante :

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1}(235 + t_1) + (t_1 - t_a)$$

où :

t_2 = température de l'enroulement (°C) à la fin de l'essai;
t_1 = température de l'enroulement (froid) ou au moment de la mesure de la résistance initiale (°C);
t_a = température de l'air ambiant (°C) à la fin de l'essai;
R_1 = résistance initiale de l'enroulement (froid);
R_2 = résistance de l'enroulement à la fin de l'essai.

b) *Température ambiante.*

1. *Matériel à refroidissement par air.*

Les thermomètres doivent être placés autour du matériel, à une distance de ce dernier égale à environ 1 m, et à une hauteur égale à environ la moitié de celle du matériel. Ils devraient être à l'abri des rayonnements thermiques et des courants d'air; les boules peuvent être placées dans des petits récipients remplis d'huile afin d'égaliser les variations de température.

2. *Matériel à refroidissement par eau.*

Les thermomètres doivent être placés dans l'eau de refroidissement à l'entrée du matériel.

Durée des essais d'échauffement.

Les essais seront poursuivis jusqu'au moment où le taux d'accroissement de la température ne dépasse pas 2 °C/heure.

ANNEXE.

Détermination par le calcul, à partir de la puissance conventionnelle, du facteur de marche, utilisable pour une puissance et un réglage quelconque s'écartant des conditions relatives à la puissance conventionnelle.

Lors de la détermination par le calcul du facteur de marche susceptible d'être utilisé à un réglage quelconque conduisant à la mise en œuvre d'une puissance s'écartant de la puissance conventionnelle, l'emploi de la formule :

$$P\sqrt{X} = K$$

peut conduire à des facteurs de marche plus élevés que ceux susceptibles d'être réellement employés sans dépasser les échauffements admis.

Pour les réglages inférieurs au réglage maximum et auxquels correspondent des tensions à circuit ouvert et inférieures à la tension maximum à circuit ouvert e_m, le régime thermiquement équivalent conduit à une puissance P_t qui est, en genéral, inférieure à la puissance conventionnelle et sensiblement égale à :

$$P_t = P_c \times \frac{e}{e_m}.$$

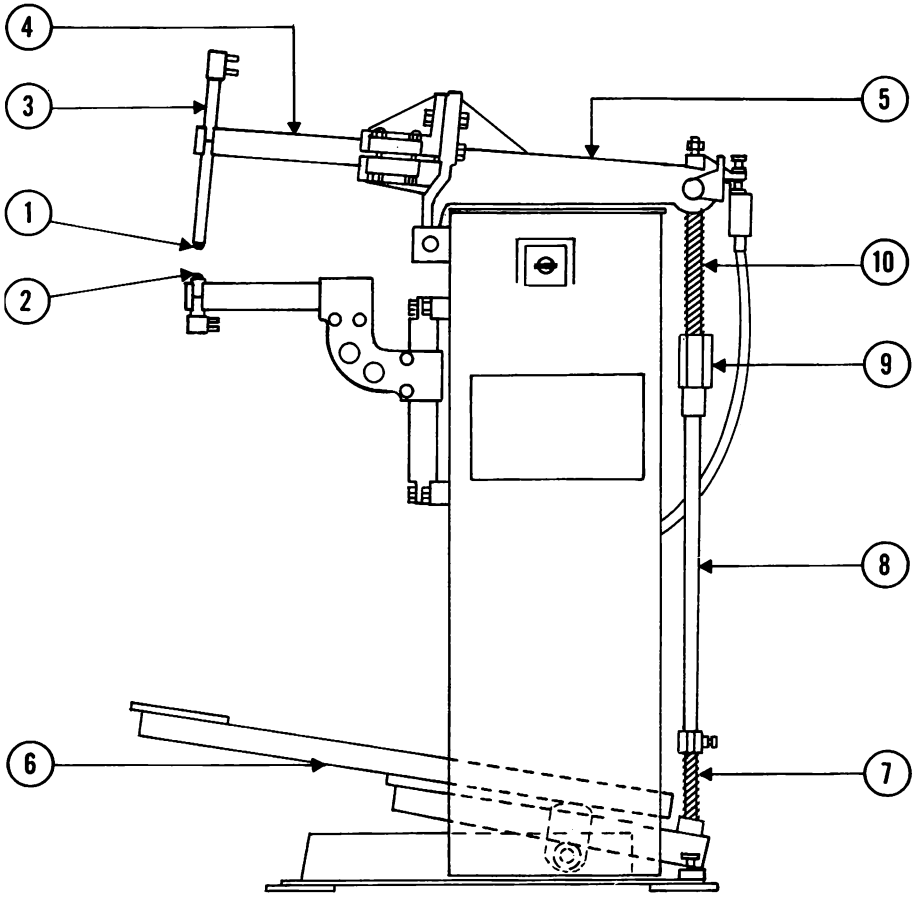


Fig. 78
Machine à souder fixe, à commande par pédale.

1. Electrode supérieure.
2. Electrode inférieure.
3. Porte-électrode.
4. Bras supérieur.
5. Balancier.
6. Pédale.
7. Ressort de rappel.
8. Tringle.
9. Réglage de la pression.
10. Ressort de pression.

LES DISPOSITIFS DE MISE EN MOUVEMENT ET EN PRESSION DES ÉLECTRODES DE SOUDAGE

Ces dispositifs doivent commander la descente du porte-électrode mobile, l'accostage des électrodes sur les pièces à souder, et fournir l'effort de compression sur le point de soudure.

Habituellement, les électrodes inférieures sont fixes.

Les systèmes suivants sont utilisés :

— Commande manuelle (à la main, au pied);
— Commande pneumatique;
— Commande mécanique par came (groupe moteur-réducteur);
— Commande hydraulique.

COMMANDE MANUELLE.

C'est le dispositif le plus simple. Dans les machines fixes, l'opérateur exerce, à l'aide du pied, un effort sur un levier terminé par une pédale.

Cet effort est transmis aux électrodes de soudage et multiplié à l'aide d'un jeu de leviers et de ressorts (voir figure 78).

L'opérateur appuye sur la pédale (6). Le levier de la pédale (6), dans son mouvement vers le bas, pivote autour d'un axe fixe et provoque la montée de la tringle (8) qui, par l'intermédiaire du ressort (10), fait pivoter le balancier (5) autour d'un axe fixe.

L'électrode (1) descend en décrivant un arc de cercle et accoste les pièces à souder déposées sur l'électrode (2). L'opérateur continuant à appuyer sur la pédale, le ressort (10) se comprime et un effort est appliqué sur les pièces à souder placées entre les électrodes (1) et (2).

Le réglage de l'effort aux électrodes s'effectue en agissant sur le degré de compression du ressort (10), à l'aide de l'écrou (9). Un fin de course commandé par la tringle (8) ne permet l'enclenchement du courant de soudage que lorsque l'effort est bien établi sur les pièces à souder.

Quand la soudure est terminée, l'opérateur soulève le pied et tous les mécanismes sont rappelés à leur position initiale.

L'effort de compression aux électrodes obtenu avec ce genre de dispositif ne dépasse généralement pas 300 kg, la manœuvre devient pénible pour l'opérateur et il faut utiliser une source d'énergie extérieure.

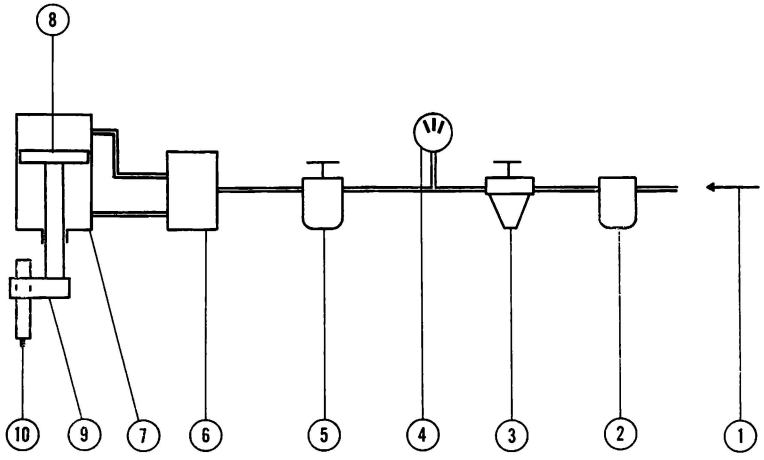


Fig. 79

Principe d'une alimentation pneumatique.

1. Raccordement source air comprimé.
2. Filtre.
3. Manodétendeur.
4. Manomètre.
5. Lubrificateur.
6. Electrovanne quatre voies.
7. Cylindre pneumatique.
8. Piston.
9. Support de porte-électrode.
10. Porte-électrode avec son électrode.

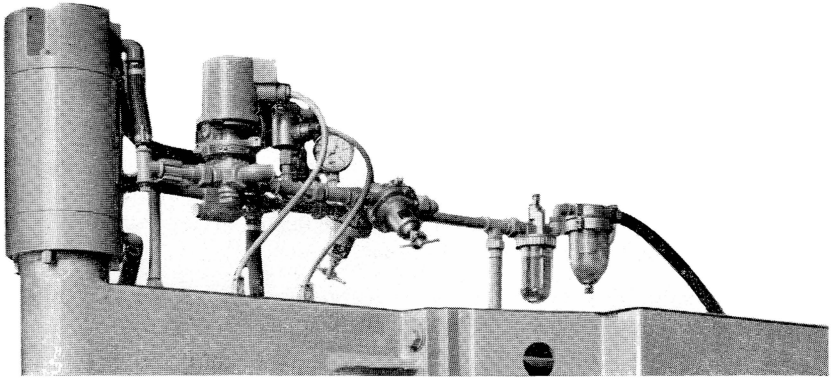


Fig. 80

Commande pneumatique de machine à souder par points.

COMMANDE PNEUMATIQUE.

L'organe moteur est un cylindre avec piston alimenté par de l'air comprimé.

Généralement, la tige du piston est fixée directement sur le support du porte-électrode et lui transmet directement l'effort.

Un dispositif pneumatique comprend généralement (voir fig. 79 et 80) :

— un filtre (2) destiné à débarrasser l'air comprimé arrivant à la machine, de l'eau, des poussières, etc., qui pourraient nuire au bon foctionnement du dispositif;

— un manodétendeur (3) destiné à réduire la pression d'air d'alimentation à la pression nécessaire pour obtenir l'effort de compression désiré. L'effort de compression est, en effet, à peu près directement proportionnel à la pression d'air d'alimentation du cylindre. Les pressions d'air comprimé varient habituellement entre 1 et 6 kg/cm^2.

— un manomètre (4) indique la pression réglée;

— un lubrificateur (5) pour la lubrification automatique des parois du cylindre;

— une électrovanne (6), dont le rôle consiste soit à admettre l'air comprimé à la partie supérieure du cylindre et à mettre la partie inférieure du cylindre à l'échappement à l'air libre (descente du porte-électrode, mise en pression des électrodes sur les pièces à souder), soit à admettre l'air comprimé à la partie inférieure du cylindre et à mettre la partie supérieure à l'échappement (position du repos);

— un cylindre (7) avec piston (8) dont la tige est fixée sur le support (9) du porte-électrode (10) et lui communique les efforts.

On utilise des cylindres à double effet et des cylindres à simple effet.

Dans ce dernier type, le rappel du piston vers le haut (position de repos) se réalise par un ressort, quand la partie supérieure du cylindre est mise à l'échappement.

On utilise également des cylindres avec partie inférieure alimentée en permanence par de l'air comprimé qui donne l'effort de rappel nécessaire. L'arrivée de cet air comprimé n'est pas contrôlée par une électrovanne.

Il existe également des cylindres en tandem commandant chacun un piston solidaire d'une seule tige.

Des dispositifs sont prévus pour assurer le guidage et éviter la rotation de la tige de piston.

La commande pneumatique est très souvent utilisée, surtout dans les machines fixes, grâce à sa simplicité, son prix réduit, son entretien facile et sa souplesse.

Elle convient très bien à la réalisation de cycles à pression variable.

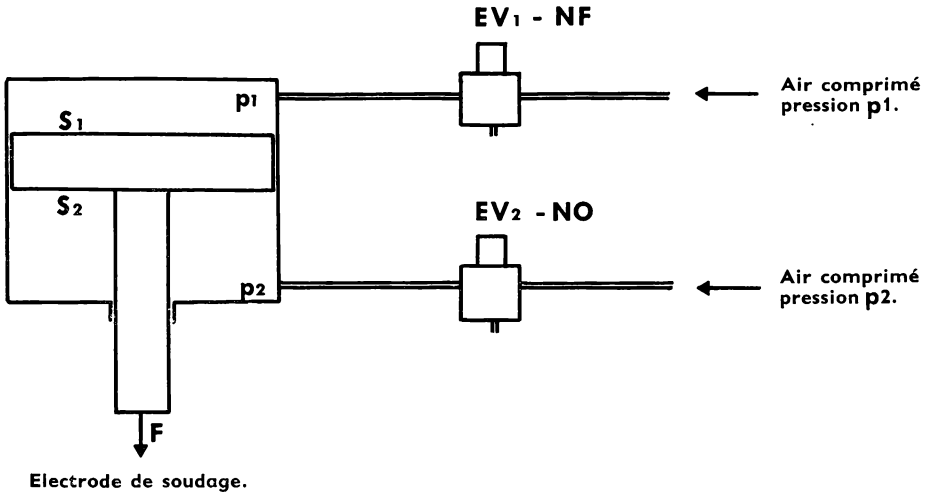


Fig. 81
Dispositif pneumatique pour cycle à pression variable.

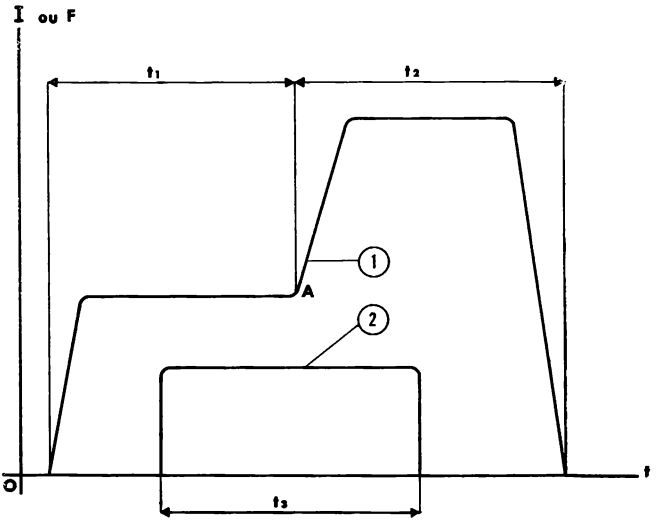


Fig. 82
Cycle de soudage avec variation de pression
1. Effort aux électrodes. 2. Intensité du courant de soudage.

Le schéma de fonctionnement d'un cycle à pression variable est donné à la figure 81.

Le cylindre comprend deux chambres : la chambre supérieure où la surface du piston est S_1 et la chambre inférieure où la surface du piston est S_2.

L'admission d'air comprimé à la chambre supérieure est commandée par l'électrovanne EV_1. C'est une électrovanne trois voies normalement fermée (NF). A l'état de repos, c'est-à-dire l'électrovanne n'étant pas excitée électriquement, l'air comprimé n'est pas admis à la chambre supérieure qui est mise en communication avec l'atmosphère par l'échappement de la vanne même. Si l'électrovanne est excitée électriquement, l'orifice d'échappement de la vanne est fermé et l'air comprimé, réglé à la pression p_1, est admis dans la chambre supérieure du cylindre.

L'admission d'air comprimé à la chambre inférieure est commandée par l'électrovanne EV_2. C'est une électrovanne trois voies normalement ouvertes (NO) qui à l'état de repos (non excitée), dirige l'air comprimé à la pression p_2 dans la chambre inférieure du cylindre.

Si l'électrovanne est à l'état excité, l'admission d'air comprimé est coupée et la partie inférieure du cylindre est mise en communication avec l'atmosphère par l'échappement de la vanne.

Le cycle de soudage se réalise comme suit (voir fig. 82) :

Pendant l'accostage et une partie du temps de soudage (t_1), seule l'électrovanne EV_1 est excitée, l'électrovanne EV_2 reste à l'état de repos :

Effort aux électrodes $= p_1 \cdot S_1 \cdot - p_2 \cdot S_2$.

A un moment donné (point A), après le temps t_1, l'électrovanne EV_2 est mise sous tension automatiquement grâce à un appareil électronique, tandis que l'électrovanne EV_1 reste excitée. L'air comprimé est évacué de la chambre inférieure.

Effort aux électrodes $= p_1 \cdot S_1$.

Cet effort $p_1 \cdot S_1$ est l'effort de forgeage qui peut être notablement supérieur à l'effort de soudage $p_1 \cdot S_1 - p_2 \cdot S_2$.

Cet état persiste jusqu'à la fin du maintien. A la fin du maintien, les deux électrovannes sont désexcitées et la tête remonte, revenant à l'état initial.

Le cyclindre moteur est habituellement monté à l'avant du bras supérieur et se trouve à peu près dans l'axe du support de porte-électrode (voir fig. 83).

Dans certains types de machine, le cylindre moteur est monté à l'arrière de la machine même (voir fig. 84).

Dans ce cas, l'effort est transmis aux électrodes par l'intermédiaire de leviers et de ressorts. L'avantage de cette dernière disposition est d'assurer un excellent dégagement du bras supérieur nécessaire pour certaines applications (soudage de certains types de boîtiers par exemple).

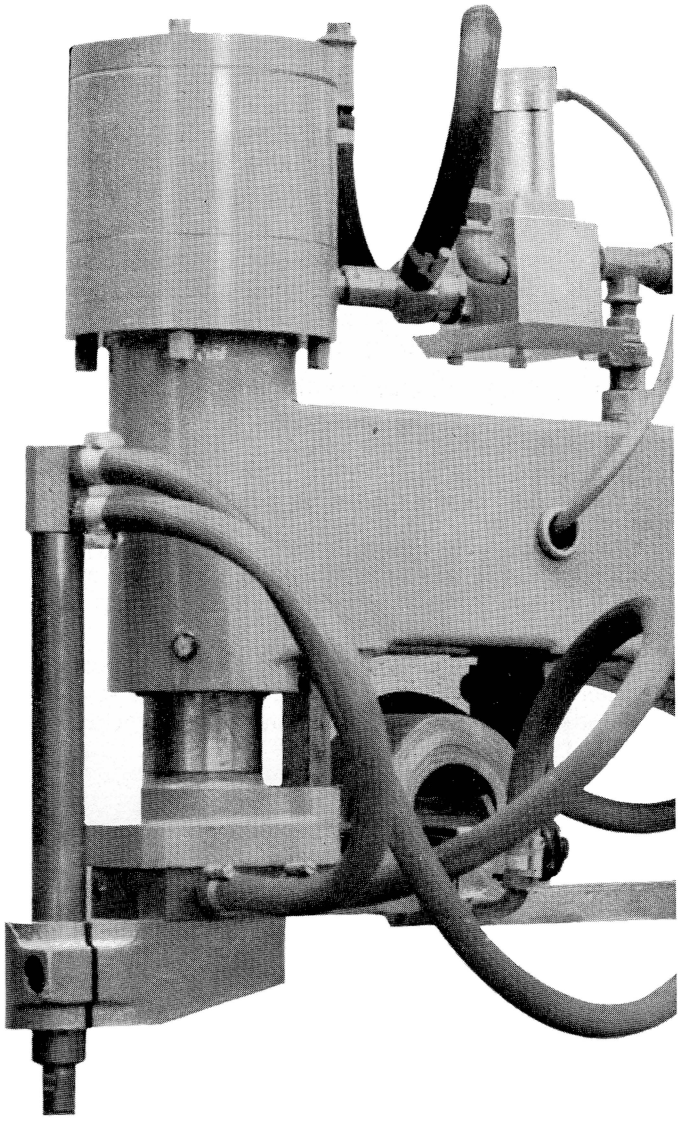


Fig. 83

Tête pneumatique de machine à souder par points.

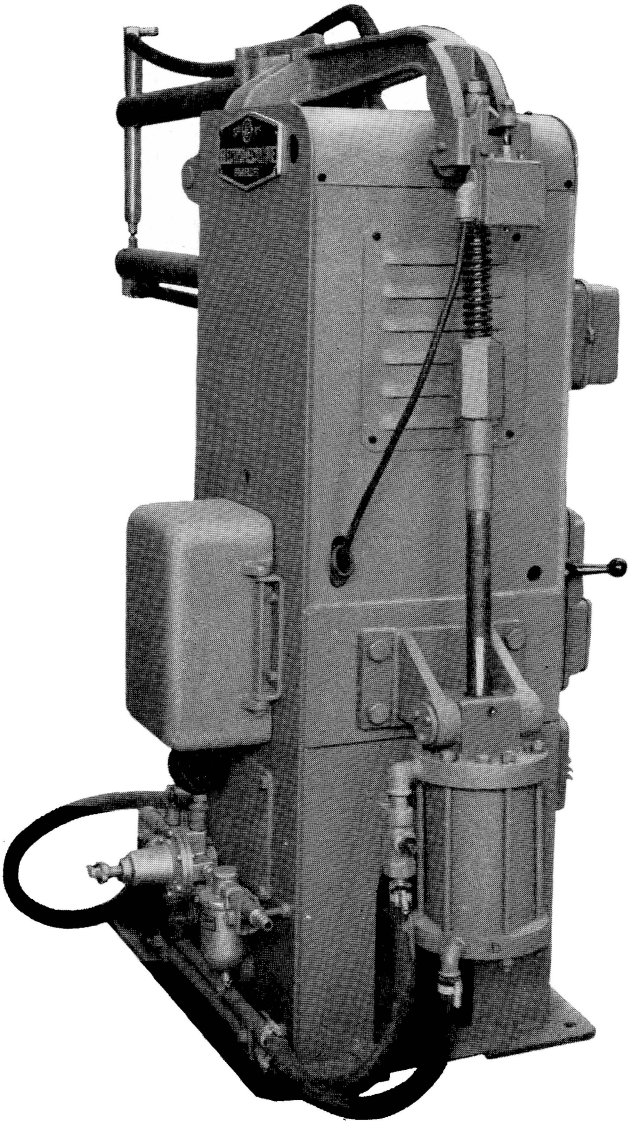


Fig. 84

Machine à souder par points avec cylindre pneumatique monté à l'arrière.

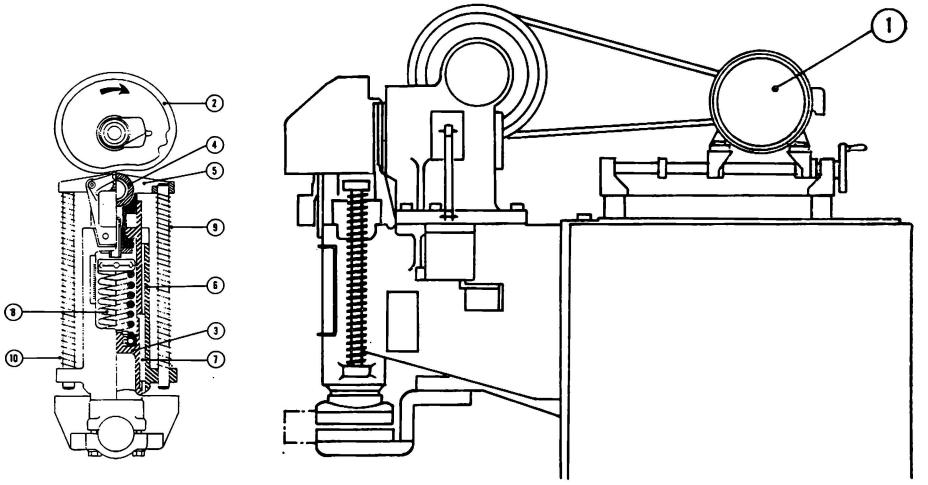


Fig. 85
Tête de machine à souder à commande mécanique par came.

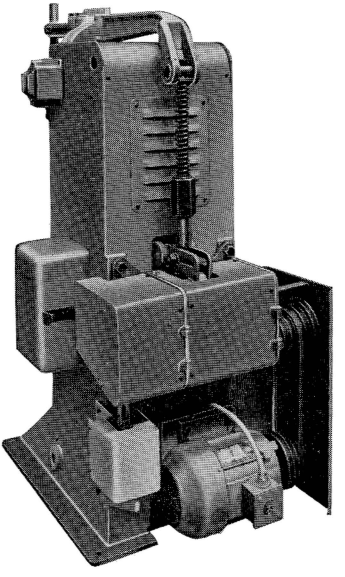


Fig. 86
Commande par came actionnée par un groupe moteur-réducteur.

COMMANDE MÉCANIQUE PAR CAME.

Une came de forme appropriée est utilisée comme organe de transmission du mouvement et de l'effort de soudage. Le mouvement de rotation de la came est assuré par un réducteur ou variateur de vitesse commandé par un moteur électrique.

La figure 85 donne les croquis de principe d'un mécanisme de ce genre.

Il comprend :

— un moteur d'entraînement (1);
— un variateur de vitesse constitué par une poulie dont le diamètre utile est réglable;
— un réducteur;
— un embrayage;
— une came de pression (2);
— un coulisseau (3) solidaire de l'électrode supérieure.

Le moteur électrique étant mis en marche, l'électro-aimant d'embrayage est excité par une pédale de manœuvre : les plateaux d'embrayage se solidarisent.

A ce moment, le moteur actionne la came de pression par l'intermédiaire du réducteur. Dans sa rotation, la came pousse le galet (4) vers le bas. Le support (5) solidaire du galet entraîne le coulisseau (3) dans ce mouvement. La chemise (6) reste fixe. La cale (7) assure le guidage du coulisseau (3) dans la chemise (6).

Au moment où l'électrode supérieure entre en contact avec l'électrode inférieure, le coulisseau (3) s'immobilise; le support (5) poursuivant sa descente comprime le ressort (8) et applique ainsi la pression sur les électrodes.

La came poursuivant sa rotation permet aux ressorts de rappel (9) et (10) de ramener l'ensemble vers le haut.

Une petite came, solidaire de l'axe de commande de la came de pression, actionne un fin de course qui enclenche le courant de soudage. La position de la came de courant doit être telle que l'enclenchement du courant ne se produise que lorsque les électrodes sont sous pression.

Ce mécanisme est encore utilisé dans certaines presses à souder.

Il est aussi utilisé dans certaines machines à cadence rapide (voir figure 86). Dans ce dernier cas, le groupe moteur réducteur se trouve à l'arrière de la machine. La came transmet le mouvement au bras supérieur pivotant par l'intermédiaire d'une tringle et d'un ressort.

Une fois le moteur en marche et l'embrayage excité, la rotation de la came assure successivement la descente du bras supérieur, l'accostage et la mise sous pression des électrodes, la remontée et le même cycle se reproduit.

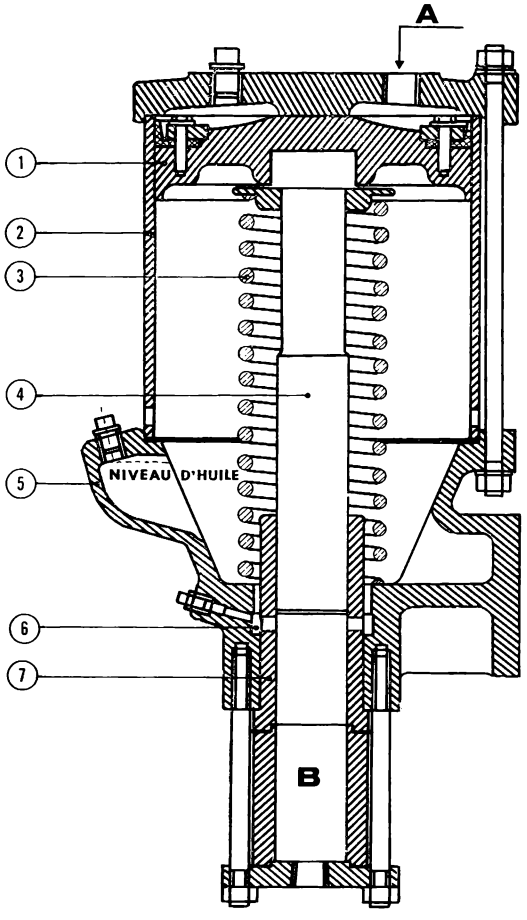


Fig. 87

Coupe d'un surpresseur.

1. Piston.
2. Cylindre basse pression.
3. Ressort de rappel du piston vers le haut.
4. Piston à haute pression (huile).
5. Cuve de réserve d'huile.
6. Arrivée de l'huile au cylindre.
7. Cylindre.

COMMANDE HYDRAULIQUE.

Lorsque l'encombrement du cylindre de pression doit être très réduit, par exemple dans le cas des soudeuses à points multiples, ou lorsque le poids du cylindre doit être le plus faible possible, par exemple dans le cas des pinces de soudage, on a recours à un fluide à haute pression. Le fluide à haute pression utilisé est généralement l'huile (parfois l'eau).

Exemple : Admettons qu'un effort aux électrodes de 500 kg soit nécessaire.

En utilisant de l'air comprimé à 5 kg/cm², la surface du piston moteur devra être de :

$$\frac{500}{5} = 100 \text{ cm}^2, \text{ soit diam. } 113 \text{ mm.}$$

En utilisant de l'huile sous une pression de 100 kg/cm², la surface du piston moteur devra être de :

$$\frac{500}{100} = 5 \text{ cm}^2, \text{ soit diam. } 25 \text{ mm.}$$

Cet exemple montre l'avantage des hautes pressions au point de vue encombrement et poids du cylindre.

On utilise :

a) les surpresseurs pneumo-hydrauliques;
b) les pompes hydrauliques.

Les surpresseurs pneumo-hydrauliques.

Dans ces appareils, une faible pression d'air comprimé est transformée en une forte pression d'huile.

La figure 87 donne la coupe d'un type de surpresseur à huile.

Il comprend :

- un cylindre basse pression (2) alimenté en A par de l'air comprimé qui agit sur le piston (1). Un ressort (3) rappelle le piston vers le haut;
- un piston haute pression (huile) (4) coulissant dans le cylindre (7) et solidaire du piston (1);
- une cuve (5) servant de réservoir d'huile. L'arrivée d'huile au cylindre haute pression se fait en (6).

La haute pression s'établit donc dans la chambre (B) lorsque l'air comprimé est admis en A. La pression d'air comprimé agissant sur le piston (1) se transmet au piston (4) qui crée, dans la chambre (B), une pression égale à la pression d'air comprimé multipliée par le rapport des surfaces des pistons (1) et (4). Le cylindre haute pression d'utilisation est raccordé à la chambre par canalisation fixe ou souple. Ce cylindre moteur haute pression commande le porte-électrode. De cette façon, on peut obtenir des pressions hydrauliques 5 à 20 fois supérieures à la pression d'air comprimé d'alimentation.

Ces surpresseurs sont utilisés sur machines à souder par points fixes, sur machine à souder à points multiples et surtout dans les installations à pinces de soudage mobiles.

La figure 88 représente un poste à pince hydraulique.

Pompes hydrauliques.

Ce sont des pompes volumétriques commandées par moteur électrique qui fournissent l'huile sous pression destinée à alimenter des cylindres, vérins etc. Les pressions de fonctionnement varient de 10 à 150 kg/cm².

Ces pompes font partie de centrales hydrauliques qui comportent en plus un réservoir à huile, des appareils divers : électrovannes, soupapes de décharge, interrupteurs à pression, distributeurs divers, clapets, manomètres, etc., raccordés suivant un schéma hydraulique de fonctionnement.

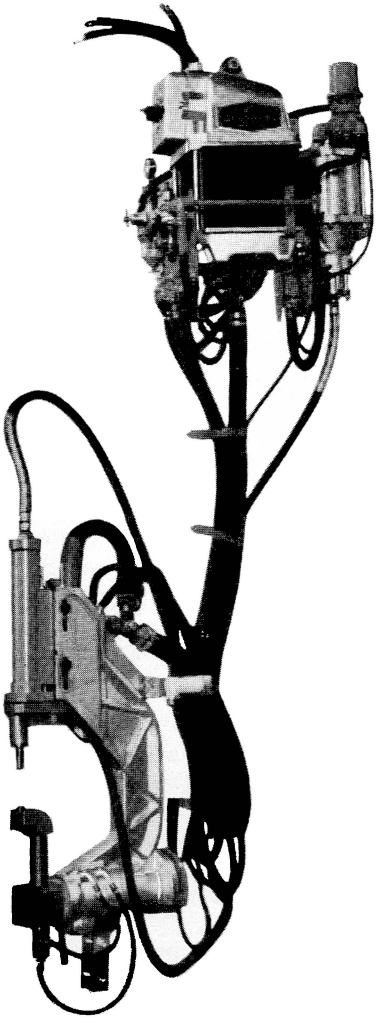


Fig. 88

Transformateur suspendu avec surpresseur et pince hydraulique.

COURSE DE L'ELECTRODE MOBILE.

La course de soudage est la course parcourue par l'électrode mobile en passant de sa position supérieure de repos à la position accostage et serrage des pièces à souder.

C'est la forme des pièces à souder qui détermine la course nécessaire de l'électrode mobile (voir figure 89).

La course de soudage de l'électrode mobile devra toujours être choisie la plus petite possible.

Les avantages d'une course de soudage faible sont les suivants :

— possibilité de cadences de soudage plus élevées;
— plus grande facilité pour l'opérateur de réaliser les points de soudure aux emplacements voulus;
— consommation d'air comprimé réduite;
— martelage des électrodes fortement diminué;
— dans le cas des machines à commande manuelle, la fatigue de l'opérateur est diminuée.

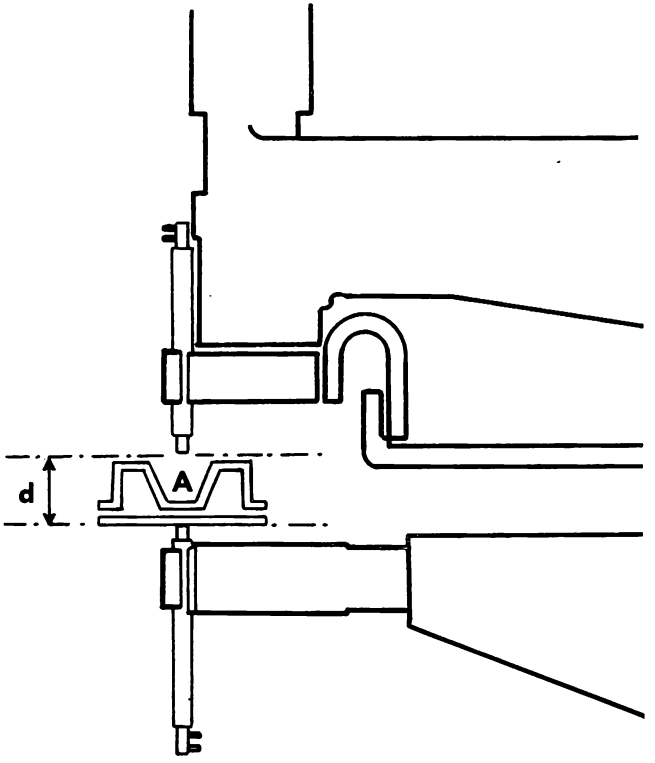


Fig. 89
Course de soudage.
Point de soudure à réaliser en A.

Sur les machines pneumatiques à simple course, la course de soudage maximum atteint généralement 30 à 60 mm, rarement 100 mm.

Cette course est réglée à la valeur convenable habituellement par un simple déplacement en hauteur des porte électrode.

Certains assemblages, à cause de leur encombrement, demandent pour leur introduction entre les électrodes, une distance importante entre celles-ci.

C'est pour cette raison que des machines à double course ont été créées :

1) une course dite de grande ouverture entre les électrodes, ou course de dégagement;
2) une course de soudage ou de travail.

Pour l'introduction des pièces entre les électrodes, on provoque la grande ouverture. La distance entre les électrodes est alors maximum et égale à la course de grande ouverture plus la course réglée de soudage.

Les pièces à assembler étant mises en place, on provoque la première descente de l'électrode qui est ainsi en position « approche » prête à souder.

Les points de soudure étant réalisés, on provoque la remontée de l'électrode supérieure à sa position « grande ouverture» . L'assemblage peut être dégagé.

Plusieurs systèmes de double course ont été réalisés :

— des systèmes mécaniques utilisés surtout dans les pinces de soudage. On provoque le pivotement de l'un des bras à l'aide d'un mécanisme à leviers commandé manuellement;
— des systèmes pneumatiques, réalisés par des cylindres doubles ou des cylindres à deux pistons.

Habituellement, seule l'électrode supérieure est mobile et équipée d'un système double-course. Les courses de grande ouverture sont fixes ou réglables (par exemple de 40 à 100 mm).

La figure 90 donne la photo d'une tête pneumatique à double course.

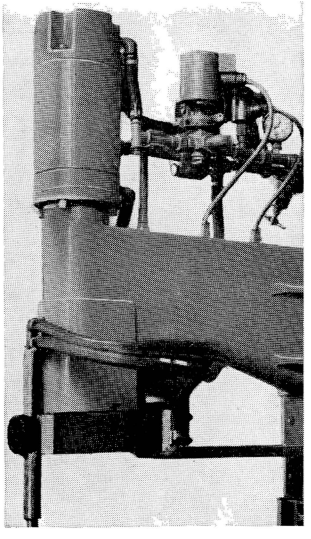


Fig. 90
Tête pneumatique avec grande ouverture d'une machine à souder par points.

LES ÉLECTRODES ET PORTE-ÉLECTRODES

L'ÉLECTRODE.

L'électrode est l'organe de la machine directement en contact avec les pièces à souder. Elle est l'outil de la machine à souder par points et donc la pièce d'usure.

L'électrode fait partie du circuit secondaire de soudage.

Elle doit localiser et concentrer le courant de soudage d'intensité élevée et transmettre l'effort de compression à chacun des endroits où l'on veut réaliser des points de soudure. Elle doit dissiper la chaleur engendrée localement le plus rapidement possible.

Qualités demandées à une électrode :

— Elle doit être en matériau de conductibilité élevée.

— Elle doit avoir une résistance de contact avec les pièces à souder la plus faible possible afin d'empêcher tout échauffement nuisible en surface.

— Elle doit être en matériau d'une dureté et d'une résistance mécanique élevées même à haute température.

En effet, les électrodes ont une section de passage du courant relativement réduite par rapport aux autres parties du circuit électrique secondaire et pourraient être le siège d'un échauffement élevé par effet Joule.

Elles sont, en outre, en contact avec les tôles à l'endroit du point de soudure et sont le siège d'un échauffement supplémentaire par conduction. De plus, la pointe d'électrode de surface relativement petite transmet un effort élevé à un matériau pouvant être très dur, d'où taux de travail important à la pointe d'électrode et tendance à l'écrasement de la pointe.

— Elle doit être de dimensions et de forme adéquates pour permettre le soudage aux endroits désirés des pièces à assembler.

— Elle doit présenter une surface de contact déterminée avec la pièce à souder pour assurer l'obtention d'un diamètre de point donné. Il est très important que cette surface de pointe qui délimite la surface de passage du courant de soudage aux pièces à assembler, reste assez constante au cours de la production. En effet, la densité de courant de soudage doit être maintenue entre certaines limites, sinon l'effet Joule est insuffisant et la fusion du point n'a pas lieu (voir fig. 91).

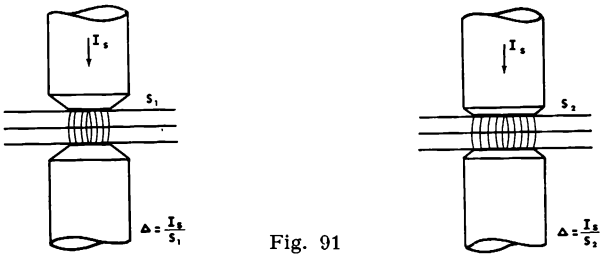


Fig. 91

Matériau.

Le cuivre pur est à déconseiller à cause de sa dureté et de sa résistance mécanique trop faibles. De plus, l'échauffement local au contact des pièces à souder a comme effet néfaste de recuire le cuivre qui, à cet état, a une dureté encore diminuée.

Des matériaux spéciaux composés de cuivre et de molybdène, cadmium, chrome, tungstène ont été élaborés.

Le tableau donne quelques caractéristiques comparatives entre le cuivre et un alliage cuivre-chrome.

Alliages	Limite élastique kg/mm²	Charge de rupture kg/mm²	Allongement %	Dureté Brinell	Conductibilité en % par rapport au cuivre électrolytique
Cuivre au chrome en barreau.	35	50	15	150	85
Cuivre au chrome coulé	17,5	35	25	110	80
Cuivre laminé	5	25	35	90	98
Cuivre coulé	1,4	21	55	40	70

Dans des conditions moyennes d'utilisation, une électrode en cuivre allié demande une retouche de la pointe après 4 000 à 6 000 points de soudure tandis qu'une électrode en cuivre doit être retouchée après quelques centaines de points seulement.

Les alliages pour électrodes ont été classés suivant leurs propriétés.

Nous donnons au tableau quelques types d'alliages suivant classification RWMA (Resistance Welder Manufactures Association) :

Matériau	Dureté Brinell	Conductibilité électrique %	Température d'adoucissement °C	Charge de rupture kg/mm²	Allongement %
Classe 1 (RWMA)	94-114	85	250	47	20
Classe 2 (RWMA)	116-159	80	500	53	15
Classe 3 (RWMA)	180-240	50	500	70	10
Classe 12 (RWMA — grade 20 K3)	313-342	30-35	env. 1000	60	—

Le matériau classe 2 est habituellement utilisé pour le soudage par points de l'acier doux, des alliages d'aluminium.

Le matériau classe 3 est à conseiller pour le soudage par points des aciers inoxydables et réfactaires.

Forme et dimensions des électrodes.

La forme et les dimensions des électrodes dépendent :

a) Des caractéristiques mécaniques et électriques des matériaux à souder : dureté, densité de courant nécessaire au soudage, résistance de contact électrode-matériau, etc ;

b) Des épaisseurs à souder qui conditionnent la surface de la pointe d'électrode, l'intensité et le temps de soudage ;

c) De l'accessibilité des endroits où il faut réaliser des points de soudure ;

d) De l'aspect extérieur demandé à la surface des points de soudure ;

e) Des cadences de soudage (nombre de points par minute). Il faut éviter un échauffement exagéré par effet Joule ;

f) Des conditions d'entretien des électrodes sur la machine même.

Une électrode est caractérisée par les dimensions reprises au croquis figure 92.

Une électrode est généralement refroidie par circulation d'eau. A cet effet, un trou est foré dans son axe pour l'introduction d'un tube qui amène l'eau de refroidissement le plus près possible de la pointe. Le circuit d'eau se fait suivant le croquis (fig. 93). L'extrémité de ce tube en cuivre ou en laiton est coupée en biseau et arrive à environ 1 à 2 mm du fond du trou de l'électrode. L'assemblage de l'électrode sur le porte-électrode doit être étanche.

L'emmanchement conique assure cette étanchéité et, de plus, permet un montage et un démontage faciles.

Le diamètre D de l'électrode sera d'autant plus grand que l'intensité du courant secondaire, le temps de soudage et la cadence seront élevés.

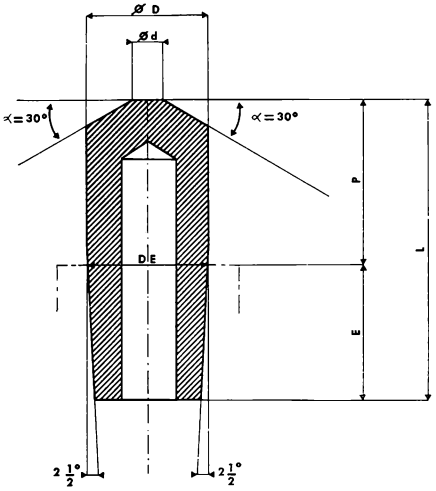


Fig. 92

Electrode à pointe tronconique pour machines à souder par points.

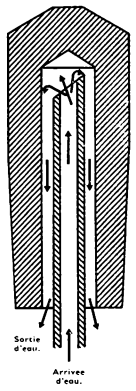
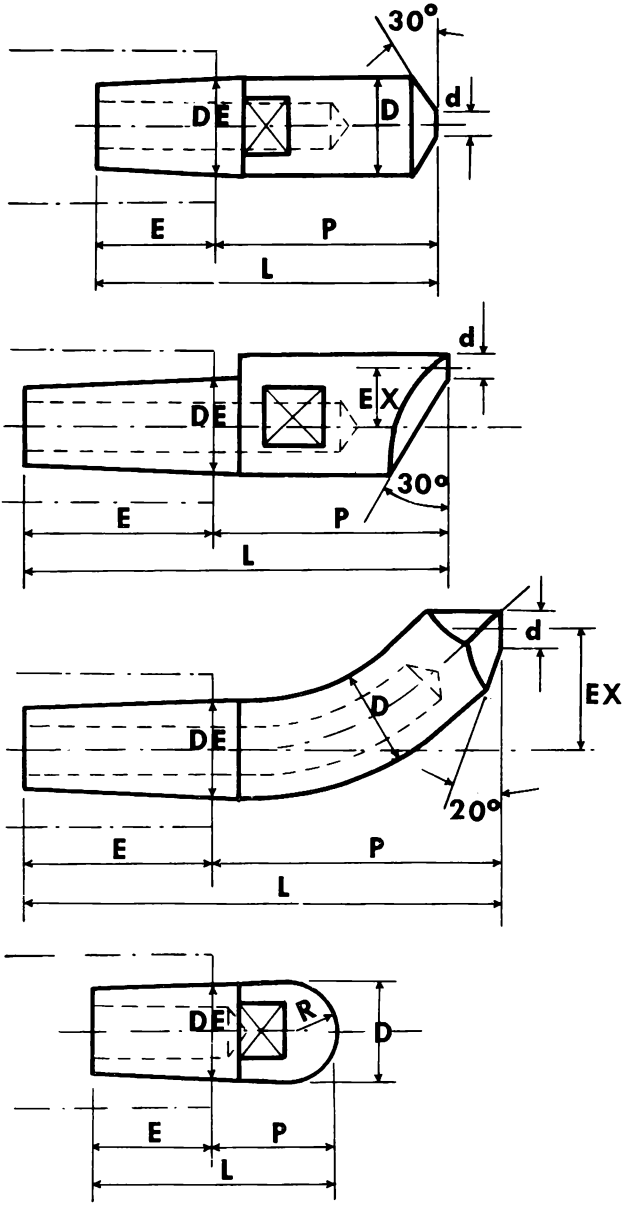


Fig. 93

Circulation d'eau dans une électrode.



Electrode droite à pointe tronconique.

Electrode excentrée.

Electrode déportée

Electrode à pointe ronde.

Fig. 94
Diverses formes d'électrodes

Deux formes principales de pointe sont utilisées :

— pointe tronconique;

— pointe sphérique (ou bombée).

Dans le cas des électrodes tronconiques, l'angle α (fig. 92) sera au maximum de 30°. On ne prendra des valeurs supérieures à 30° qu'au cas où la forme des pièces à souder le nécessiterait mais plus cet angle α sera grand, plus l'usure et la déformation de la pointe d'électrode seront rapides.

Les avantages des électrodes à pointe bombée sont les suivants :

— Empreintes en surface et pénétration des pointes d'électrode beaucoup moins marquées. Bel aspect en surface.

— Meilleur refroidissement de la pointe d'électrode.

— Meilleur accostage. Alignement des électrodes moins critique que pour les électrodes tronconiques.

— Forme du point de soudure très régulière.

— Un rayon de bombage convient pour plusieurs épaisseurs.

Comme pour les rivets, le diamètre du point de soudure sera fonction de l'épaisseur des tôles à assembler. Le diamètre des pointes d'électrode et le rayon de bombage ont été déterminés en fonction des épaisseurs à souder (voir tableau de la page 84).

On utilise également des électrodes à pointe plate si un minimum d'empreinte est exigé sur l'une des faces de l'assemblage. L'autre électrode aura naturellement un diamètre de pointe normal, dépendant de l'épaisseur.

Des électrodes à pointe ronde sont employées dans certains cas. La forme de l'électrode même dépendra des assemblages à réaliser. L'électrode idéale est l'électrode représentée à la figure 92.

Le refroidissement d'une électrode droite est plus efficace, son usinage est le plus simple et son usure est la plus réduite; mais la forme des assemblages a conduit à la conception de divers types d'électrodes dont certains sont repris aux croquis (fig. 94) :

— électrode droite normale;

— électrode excentrée;

— électrode déportée;

— électrode à pointe ronde.

Les dimensions d'électrodes ont été standardisées.

Le tableau ci-dessous donne les dimensions normales du type d'électrode droite longue à pointe tronconique.

D mm	DE mm	E mm	d mm	P mm	L mm	clé à utiliser
13	12,7	16	3	29	45	11
16	15,5	20	4	36	56	14
20	19	25	5	45	70	17
25	24,9	31,5	6	58,5	90	22

LES PORTE-ÉLECTRODE.

Le porte-électrode est l'organe conducteur intermédiaire entre l'électrode et les bras conducteurs de la machine.

L'électrode est fixée à la partie supérieure du porte-électrode généralement par emmanchement conique.

La fixation des porte-électrode sur les conducteurs secondaires (bras, etc.) peut se faire de plusieurs façons : brides, douille élastique, taraudage, etc.

La figure 95 donne le croquis d'un porte-électrode normal droit avec sa circulation d'eau.

Les figures 96 donnent les dimensions normalisées de quelques porte-électrode.

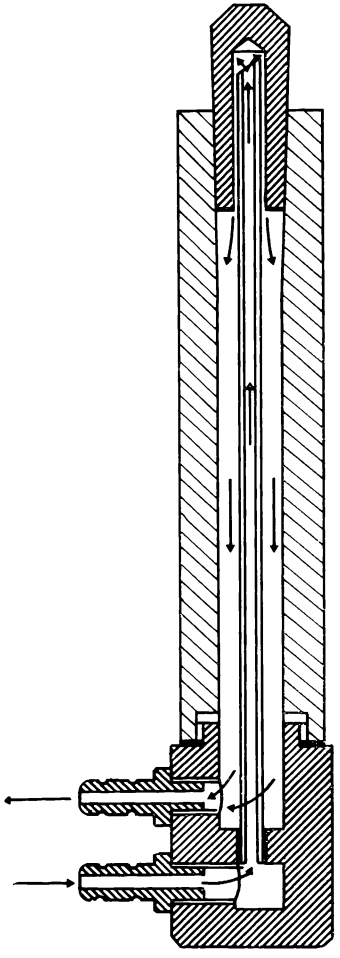


Fig. 95
Porte-électrode
avec sa circulation d'eau.

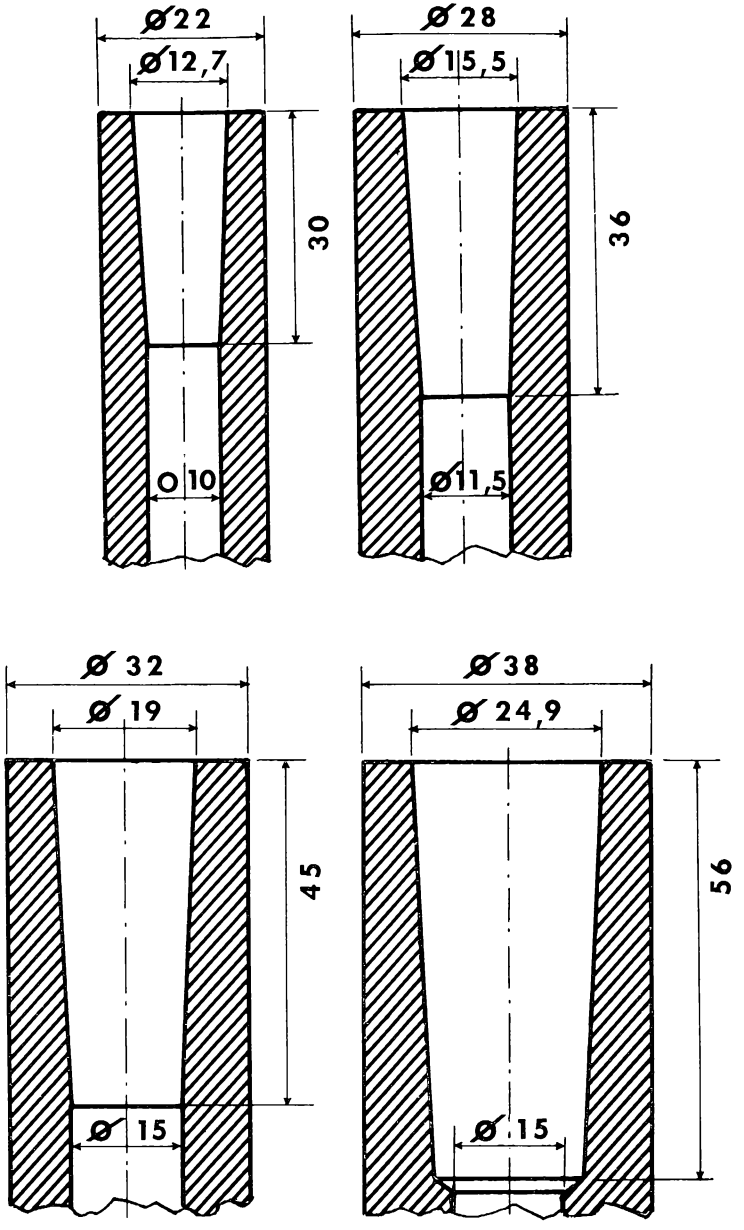


Fig. 96
Porte-électrode.
Quelques dimensions standardisées.

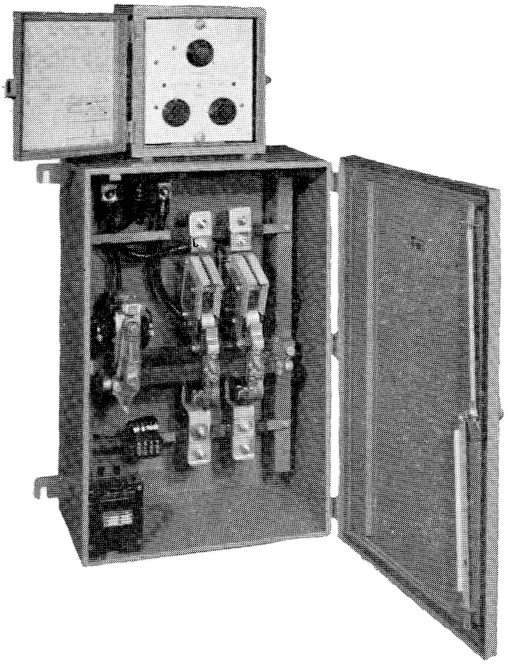


Fig. 97
Contacteur électromagnétique.

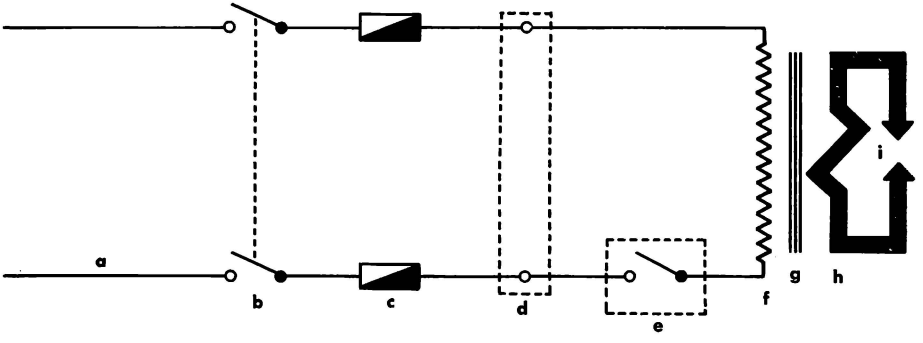


Fig. 98

L'APPAREILLAGE ÉLECTRONIQUE DE COMMANDE

Les avantages du procédé de soudage par résistance en font un des moyens d'assemblage le plus généralement employé. Il est cependant intéressant de souligner que sans l'appareillage électronique de commande, le champ d'application du soudage par résistance est limité au soudage de l'acier doux, ou des aciers faiblement alliés et à l'emploi de puissances relativement faibles.

L'appareil électronique de commande est un accessoire indispensable de la machine à souder, dont il multiplie les possibilités d'application et dont il augmente l'efficacité.

En soudage par résistance, on fait appel à l'électronique pour deux fonctions bien distinctes quoique l'appareil électronique se présente généralement sous la forme d'une armoire dans laquelle elles sont rassemblées.

La première fonction de l'appareil électronique est d'assurer le rôle d'interrupteur du courant primaire de soudage.

La seconde fonction a trait au contrôle des différentes phases du cycle de soudage en général et du temps de passage du courant de soudage en particulier.

Nous nous proposons d'étudier ces deux fonctions et de décrire les particularités des appareils conçus pour les remplir.

Avant d'entamer cette étude, parlons toutefois du contacteur électromagnétique, ce qui nous permettra de mieux comprendre les avantages des appareils électroniques.

LE CONTACTEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Schématisons le circuit électrique d'une machine à souder par résistance (fig. 98). On distingue :

a) le réseau;

b) le sectionneur;

c) les fusibles de protection;

d) les bornes de la machine;

e) le contacteur de soudage;

f) le circuit primaire du transformateur;

g) le circuit magnétique;

h) le circuit secondaire ou circuit de soudage;

i) les électrodes, galets ou mâchoires de soudage.

Le contacteur permet d'enclencher et de couper le courant de soudage. Le temps durant lequel il reste fermé détermine le temps de passage du courant dans le circuit secondaire, donc le temps de soudage.

Le contacteur peut être du type électromagnétique. C'est le type de contacteur qui était universellement employé avant l'apparition du contacteur ionique. Il est encore utilisé sur de petites machines à souder.

Le contacteur électromagnétique pour machine à souder par résistance doit satisfaire à des conditions sévères de fonctionnement. Il doit en effet réaliser une coupure rapide et pouvoir fonctionner jusqu'à des cadences de 60 coups par minute.

De nombreux perfectionnements ont été apportés aux contacteurs pour machines à souder :

— renforcement des contacts;
— contacts en alliage d'argent;
— chambre d'extinction de l'arc étudiée au point de vue forme et matière;
— soufflage magnétique renforcé.

Malgré ces perfectionnements, le contacteur électromagnétique a les désavantages suivants :

— coupure relativement lente du courant;
— coupure et enclenchement à n'importe quel endroit de la sinusoïde du courant, ce qui provoque un courant très irrégulier et des surtensions;
— fonctionnement bruyant, accompagné de vibrations surtout dans le cas du soudage automatique par points (soudage à la volée);
— inertie défavorable dans le cas de temps de soudage très courts;
— puissance limitée;
— durée de vie liée au nombre d'enclenchements réalisés.

Rappelons, avant d'aller plus avant, quelques formules relatives au branchement d'une tension sinusoïdale sur un circuit R-L, qui est toujours celui d'une machine à souder par résistance.

Considérons la figure 99 et comptons le temps à partir de la fermeture de l'interrupteur.

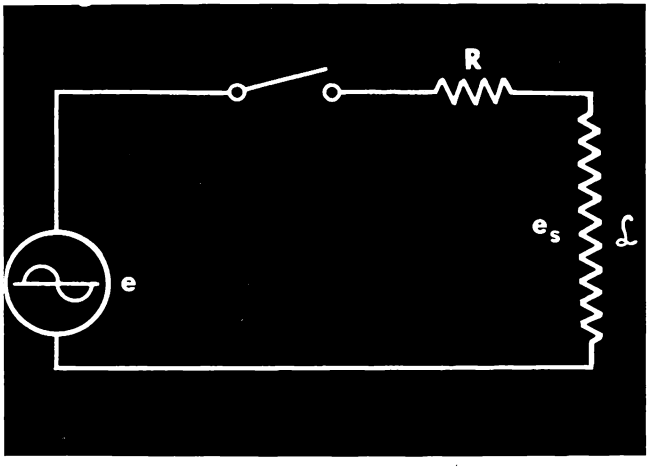


Fig. 99

Si φ est la phase de la tension sinusoïdale par rapport à l'instant de fermeture, on peut écrire :

$$e + e_s = R.\ i$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$e_s = -L \frac{di}{dt}$$

$$E_m \sin(\omega t + \varphi_0) - L \frac{di}{dt} = R\, i$$

ou

$$L \frac{di}{dt} + R.i = E_m \sin(\omega t + \varphi_0).$$

La solution générale de cette équation différentielle du premier degré s'écrit :

$$i = A \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi) + B\varepsilon^{at}$$

et on déduit que le courant est composé d'un terme permanent également sinusoïdal de même fréquence, mais décalé d'un angle φ et d'un second terme transitoire exponentiel.

Par la substitution de i dans l'équation différentielle on obtient une identité et par le développement de cette identité pour $t = 0$ et $i = 0$, on détermine la valeur des constantes et on obtient :

$$i = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi) - \frac{E_m}{Z} \sin(\varphi_0 + \varphi)\, \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}$$

formule dans laquelle :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

La représentation graphique de cette formule est reprise figure 100.

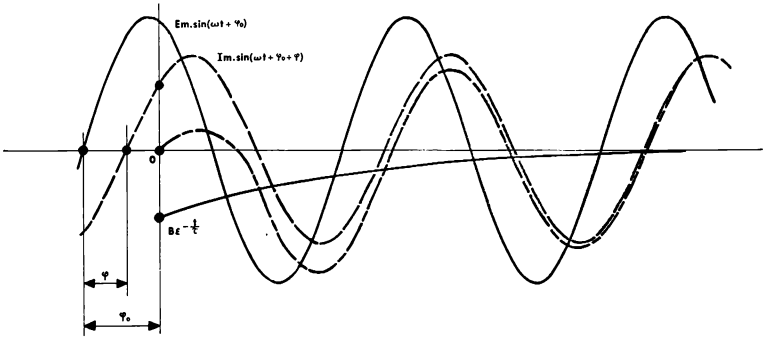


Fig. 100

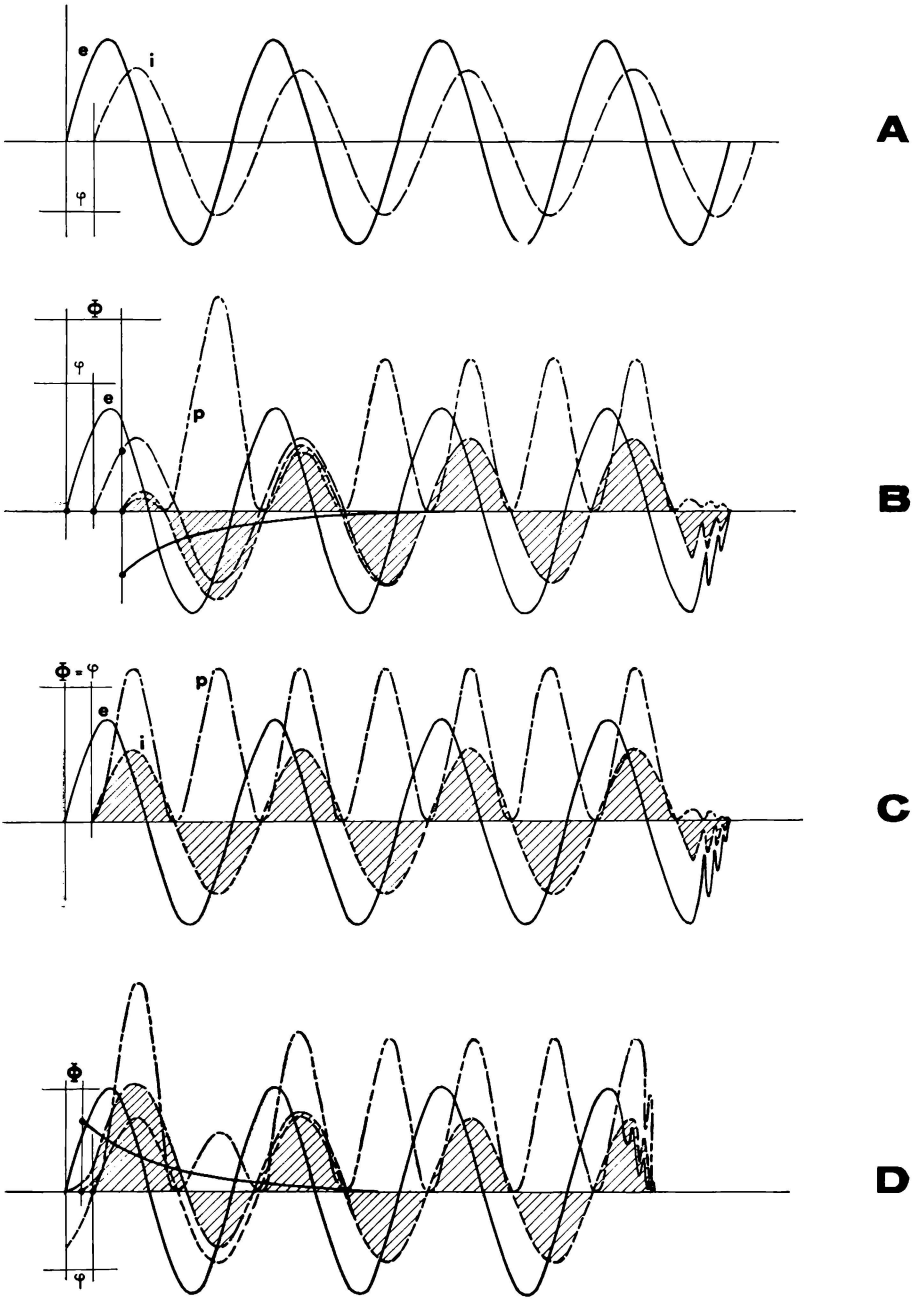


Fig. 101

Lorsque le temps est compté à partir du passage de la tension par O, on obtient :

$$i = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi) - \frac{E_m}{Z} \sin \varphi \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}.$$

L'enclenchement et la rupture du courant primaire de soudage par un contacteur électromagnétique est représenté à la figure 101.

La figure 101 A, représente la tension et le courant stabilisé dans un circuit primaire de machine à souder, dont φ est l'angle de déphasage.

Trois cas peuvent être envisagés :

$$\Phi > \varphi$$

$$\Phi = \varphi$$

$$\Phi < \varphi$$

Φ étant l'angle au moment de l'enclenchement.

La figure 101 B montre une courbe très irrégulière où le courant est très faible à l'origine ($\Phi > \varphi$).

Dans le cas où $\Phi = \varphi$ (cas extrêmement rare) le courant a une forme sinusoïdale (fig. 101 C).

La figure 101 D montre la forme du courant transitoire pour $\Phi < \varphi$. On remarque que le courant atteint une valeur supérieure à la valeur maximum qu'il atteint normalement. Cette surintensité peut parfois provoquer la saturation du transformateur, et provoquer, de ce fait même, de plus grandes distorsions.

Toute l'importance de ces irrégularités apparaît lorsque l'on se rappelle que le procédé de soudage est basé sur l'effet Joule, c'est-à-dire sur le développement d'énergie qui, lui, est proportionnel à I^2.

En traçant des courbes I^2 on constate l'irrégularité du développement d'énergie dans le temps, et l'on est forcé d'admettre que la façon de chauffer les pièces à souder n'est pas très rationnelle.

Il fallait découvrir un système permettant d'obtenir une plus grande régularité dans l'échauffement, obtenir un réel contrôle du courant de soudage.

Avant de franchir ce pas il restait à mettre au point un système contacteur qui provoquait une rupture exempte de surtensions et extra-courants, tout en autorisant l'emploi de puissances plus élevées.

Il faut remarquer, d'autre part, que des phénomènes semblables se produisent à l'ouverture du circuit et s'accompagnent instantanément de surtensions importantes.

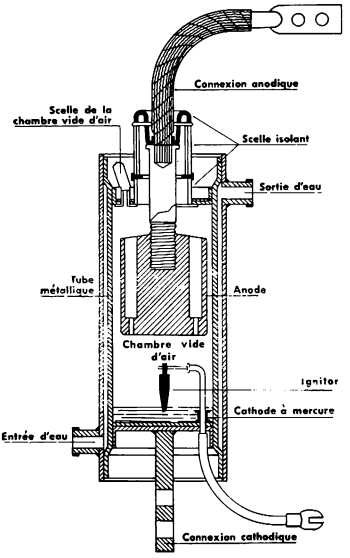


Fig. 102
Coupe d'un ignitron

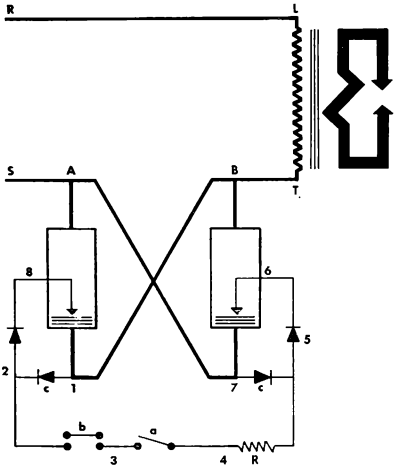


Fig. 103
Schéma d'un contacteur ionique.

LE CONTACTEUR IONIQUE

Le contacteur ionique est constitué de deux tubes ignitrons connectés en parallèle inverse.

L'ignitron est un redresseur à vapeur de mercure mono-anodique (fig. 102). Il est composé d'un tube métallique scellé, refroidi par eau. Ce qui le distingue du redresseur ordinaire, c'est son dispositif d'allumage et son mode d'utilisation.

L'allumage se produit lorsqu'un courant parcourt une électrode spéciale qui plonge en permanence dans le mercure. Il est admis que le courant traversant l'électrode produit à la surface du mercure suffisamment d'électrons pour ioniser la vapeur de mercure.

Moins de 10^{-4} secondes après le passage du courant à l'électrode appelée « igniteur » ou « allumeur » et, pour autant qu'une tension soit appliquée entre anode (+) et cathode (—), le courant traverse le tube.

C'est l'invention du tube ignitron qui a permis le développement des techniques du soudage par résistance, et l'application de celles-ci aux métaux alliés, aux alliages légers, de même que l'emploi de puissances de plus en plus élevées.

Le tube ignitron une fois amorcé reste conducteur jusqu'à la fin de l'alternance entamée. Il assure par conséquent une coupure au moment du passage par O de la sinusoïde de courant. La coupure est donc synchrone.

Par contre, le tube ignitron n'est conducteur que dans un sens. Les électrons partent du bain de mercure et sont attirés par l'anode. La chute de tension interne d'un ignitron est de l'ordre de 15 V, indépendamment du courant qui le traverse.

Pour constituer un contacteur ionique il faut donc disposer de deux tubes connectés en tête à queue (ou parallèle-inverse).

Considérons la figure 103, qui représente le schéma classique d'un contacteur ionique et examinons-en le fonctionnement.

Supposons que la tension soit positive en B.

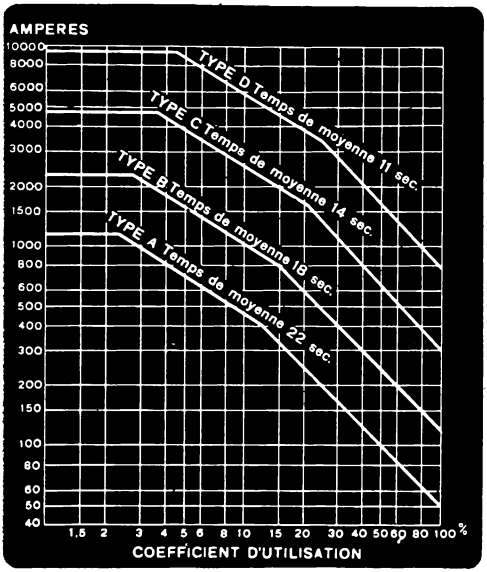
Si l'interrupteur *a* est fermé, un courant parcourt le circuit : 1-2-3-4-5-6-7.

Le redresseur sec *c* s'oppose à l'établissement du circuit 4-7 et par conséquent force le courant à parcourir 5 et 6 provoquant ainsi l'ionisation du gaz dans le tube. Un dix millième de seconde plus tard le courant principal parcourt le circuit primaire de soudage jusqu'à la fin de l'alternance en passant par le tube B (circuit R-L-T-B-7-A-S).

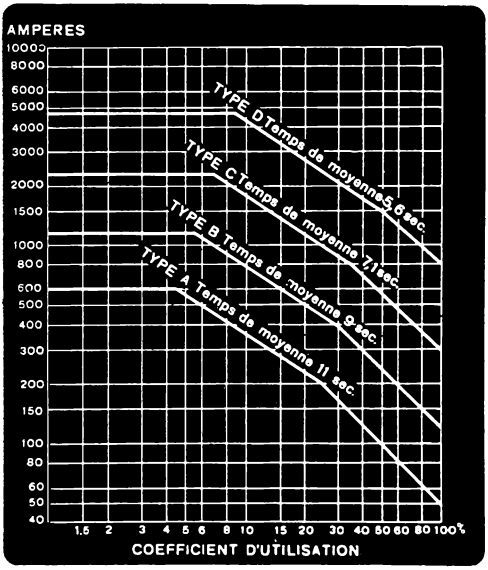
A ce moment la tension devient positive en A et un courant limité par la résistance R parcourt cette fois, 7-4-3-2-8-1 ionisant le tube A qui devient à son tour conducteur (circuit S-A-1-B-T-L-R).

Tant que l'interrupteur a reste fermé, le courant parcourt le circuit primaire, fournissant l'énergie nécessaire au circuit de soudage.

L'intensité maximum admise par les ignitrons n'a pas de valeur définie. Elle est fonction de la durée de passage du courant.



A. 200-250 volts
25-60 périodes.



B. 400-500 volts
25-60 périodes.

Fig. 104

Caractéristiques de charge des ignitrons données pour deux tubes.

Par suite de ses faibles dimensions et si l'on respecte les intensités de courant habituelles, le courant de régime d'un ignitron n'est pas très élevé; mais comme en soudage on demande de grands courants pendant des temps relativement courts (quelques périodes à quelques secondes), on peut admettre des intensités de courant beaucoup plus élevées et faire fonctionner le tube sous de fortes surcharges instantanées.

Les courbes ci-après donnent les intensités admises en fonction d'un coefficient d'utilisation et pour un temps moyen déterminé expérimentalement, pour chaque type de tube (fig. 104).

Les plus gros tubes admettent par exemple 700 A en régime continu et 10 000 A pendant 0,5 sec. sous 220 V. Leurs dimensions sont ∅ 150 mm, hauteur 400 mm. Leur vie normale est de trois ans.

Les tubes ignitrons sont refroidis par circulation d'eau. Selon le type, la consommation varie de 5 à 15 litres par minute.

Le contacteur ionique décrit ci-dessus présente les avantages suivants :

— possibilités d'établissement du courant pendant un temps inférieur à une période grâce à l'absence d'inertie;

— coupure du courant lors du passage par O de la sinusoïde;

— coupure de forte intensité;

— fonctionnement silencieux.

Il présente par contre les mêmes désavantages qu'un contacteur électromagnétique au point de vue enclenchement et n'élimine pas les phénomènes transitoires.

Un contacteur ionique muni de tube C est représenté à la figure 105.

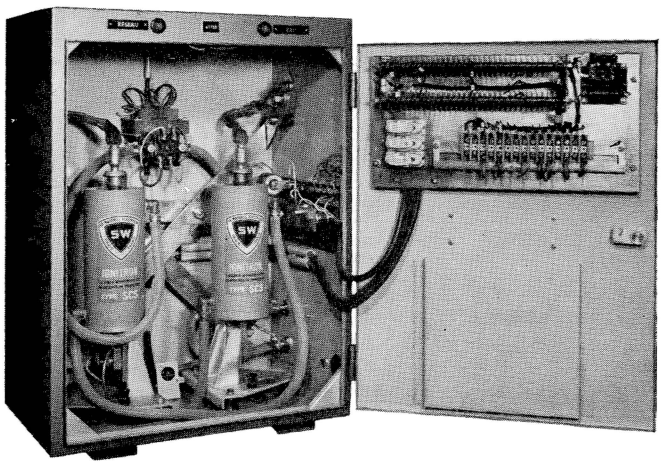


Fig. 105
Vue d'un contacteur ionique.

L'APPAREIL ÉLECTRONIQUE ASYNCHRONE

Nous avons vu qu'un contacteur ionique peut être commandé par un interrupteur placé dans le circuit des allumeurs.

Cet interrupteur peut être placé en série avec les contacts normalement fermés d'un relais commandé par un temporisateur (timer) électronique.

Cette conception est à la base des appareils électroniques synchrones.

Il existe plusieurs types de temporisateurs électroniques employés pour le contrôle du cycle de soudage ou d'une partie de celui-ci.

Ces minuteries électroniques peuvent au besoin commander également un contacteur électromagnétique au lieu d'un contacteur ionique.

Il y a plusieurs façons de réaliser un temporisateur électronique. La méthode la plus courante en construction d'appareils électroniques pour soudeuses, se base sur l'emploi du thyratron.

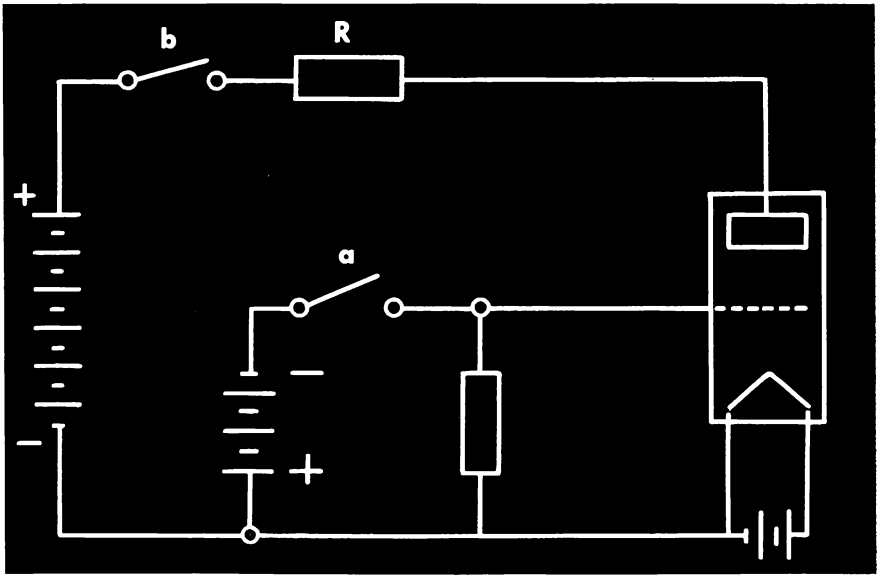


Fig. 106
Schéma de principe d'un circuit avec thyratron.

Le thyratron.

Il est utile de rappeler les principes de fonctionnement de ce tube.

Le thyratron est un tube triode rempli de vapeur de mercure, éventuellement d'argon ou d'hélium à une pression équivalente à quelques microns de hauteur de mercure.

La présence d'un gaz permet l'ionisation par choc de sorte que lorsqu'il devient conducteur, c'est un véritable arc électrique qui relie l'anode à la cathode.

Considérons le schéma de principe de la figure 106.

Soit l'interrupteur *a* ouvert. En fermant l'interrupteur *b* on applique une tension entre anode et cathode. La cathode émet des électrons qui ionisent le gaz. Un courant électrique s'établit dans le circuit anodique limité en intensité par la résistance R.

Rien ne s'oppose à l'établissement de l'arc dans le tube.

Recommençons l'expérience en fermant en premier lieu l'interrupteur *a*. Nous donnons ainsi à la grille un potentiel négatif par rapport à la cathode. Nous créons autour de la grille un champ électrique à polarité négative qui repousse les électrons (négatifs) émis par le filament de la cathode.

En fermant l'interrupteur *b*, on constate, pour autant que le potentiel de la grille soit suffisamment négatif, qu'aucun courant ne parcourt le circuit de plaque. En élevant le potentiel de la grille, c'est-à-dire en rendant la grille moins négative, il arrive un moment où le champ électrique n'est plus suffisamment intense (potentiel critique) pour s'opposer au passage des électrons attirés par l'anode. L'arc s'établit et un courant circule dans le circuit d'anode.

Une fois l'arc électrique établi, la grille perd tout contrôle sur le fonctionnement du tube et une variation de son potentiel n'est plus en mesure d'étouffer l'arc ou même de faire varier l'intensité du courant dans le circuit d'anode. Seule l'ouverture de l'interrupteur *b*, c'est-à-dire la disparition de la tension entre anode et cathode peut éteindre l'arc. Si une tension alternative est appliquée entre anode et cathode, on peut dire que lorsque l'arc s'établit il se maintient jusqu'à la fin de toute alternance entamée.

Pour presque toutes les applications pratiques et en particulier pour les appareils de contrôle de machines à souder par résistance, on applique une tension alternative entre anode et cathode.

Les minuteries électroniques.

En se basant sur les propriétés du tube thyratron on peut imaginer plusieurs schémas de temporisateur. Nous en choisissons un et nous en commentons le fonctionnement.

Le contrôleur de temps.

Le schéma de l'appareil est représenté figure 107.

Une tension alternative de 220 V est appliquée à un diviseur de tension constitué d'une résistance R_1, en série avec un potentiomètre P. La tension se répartit par exemple comme suit : aux bornes de R_1 30 V, aux bornes de P 190 V.

Une partie e de la tension aux bornes de P est appliquée entre la grille et la cathode d'un thyratron à travers une résistance R_3 et une capacité c, shuntée par une résistance variable R_2.

L'espace grille-cathode joue le rôle de redresseur de sorte que la capacité c se charge avec les polarités indiquées. La résistance R_3 a pour but de limiter le courant de charge lors du début de celle-ci.

La grille du thyratron est donc rendue très négative et le tube ne peut s'allumer d'autant plus que sa tension anodique n'est que de 30 V. Le circuit d'anode comporte la bobine d'un relais B dont un contact normalement fermé peut se trouver dans le circuit des igniteurs d'un contacteur ionique : contact *b* (fig. 103) (soit éventuellement dans le circuit de la bobine d'un contacteur électromagnétique).

On peut donc enclencher le contacteur ionique en fermant (fig. 103) le contact a (qui est en général un contact de pédale). Un second contact a_2 (fig. 107) se ferme simultanément et court-circuite le potentiomètre P. A ce moment, toute la tension de 220 V est reportée sur la résistance R_1, donc aussi sur le circuit anodique de thyratron ; de plus la charge du condensateur c n'étant plus assurée, celui-ci va se décharger dans la résistance R_2 et le potentiel de la grille va tendre vers O.

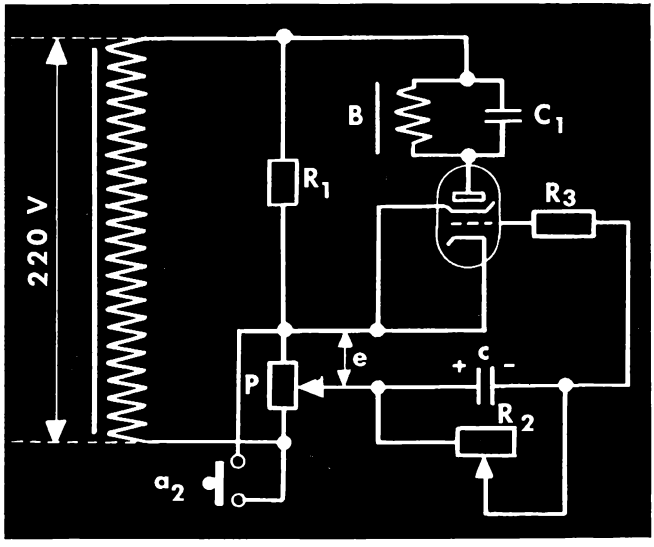


Fig. 107
Schéma d'un contrôleur de temps.

Le temps mis par c pour se décharger dépend du réglage de R_2. A un moment donné, la tension aux bornes de c s'approchant de O, le thyratron s'allume et le relais B fonctionne, coupant le circuit des igniteurs : contact b, figure 103 (ou éventuellement le circuit de la bobine d'un contacteur électromagnétique).

Le thyratron ne fonctionne que dans un sens et le courant anodique n'existe que pendant une alternance sur deux.

Le relais B (fig. 107) reste enclenché grâce au condensateur C_1 qui se décharge dans la bobine B lors de l'alternance où il n'y a pas de courant anodique.

En relâchant la pédale et en appuyant à nouveau, le même processus recommence.

Le cyclomat.

Lorsque l'on dispose d'une machine à souder à fonctionnement pneumatique, on peut réaliser le contrôle du cycle complet de soudage. L'appareil contrôle alors :

1) Le temps d'accostage, c'est-à-dire, le temps s'écoulant entre l'excitation de la bobine de l'électrovanne assurant le passage de l'air comprimé vers le cylindre, et le début du passage du courant;

2) Le temps de soudage ou temps de passage du courant (durée d'enclenchement du contacteur);

3) Le temps de maintien sous pression des électrodes, c'est-à-dire, le temps de maintien de l'excitation de la bobine de l'électrovanne.

En général, ces appareils comportent une quatrième temporisation que l'on peut mettre en service pour obtenir la répétition automatique du cycle de soudage, après un certain temps d'intervalle.

Le fonctionnement de ces temporisateurs à quatre fonctions s'imagine aisément. Un premier temporisateur servant à déterminer le temps d'accostage peut, par l'intermédiaire de son relais B, commander un temporisateur semblable qui contrôle le temps de soudage, et qui à son tour commande un troisième temporisateur. La séquence peut s'arrêter là, mais on a la faculté de pouvoir mettre en service un quatrième circuit, qui, démarré par le troisième, commandera le recommencement du cycle en faisant fonctionner à nouveau le premier temporisateur.

Par des systèmes de ce genre il est possible d'atteindre des cadences de 250 opérations minute. D'autres circuits plus perfectionnés ou plus précis que celui décrit peuvent être employés.

Attirons également l'attention sur le fait que l'on fait emploi de redresseurs secs, de circuits imprimés, de thyratrons à cathode froide, de décatrons et même de transistors pour la construction d'appareils électroniques de commande de soudeuses par résistance.

Notre but n'est pas de décrire toutes ces exécutions. Outre les deux appareils dont question ci-avant, citons encore :

Le doseur thermique.

Le doseur thermique est un contrôleur de temps, compensant les irrégularités pouvant provenir de variations de tension principale ou de résistance dans le circuit de soudage.

Au moyen d'un transformateur d'intensité, placé dans le circuit primaire, on charge par l'intermédiaire de redresseurs secs ou d'une redresseuse une capacité qui, atteignant une certaine tension, débloque un thyratron. Cet appareil est en somme un intégrateur d'énergie d'où son appellation de doseur thermique.

Le pulsomat.

Le pulsomat est un appareil du type cyclomat, dont la temporisation du temps de soudage se décompose en plusieurs impulsions de courant interrompues par des temps de repos. La durée des impulsions et des repos sont réglables.

Le nombre des impulsions est réglé par le temps total alloué au soudage proprement dit. Cet appareil s'emploie pour le soudage de fortes épaisseurs d'acier doux ou pour le soudage d'acier à haute teneur en carbone.

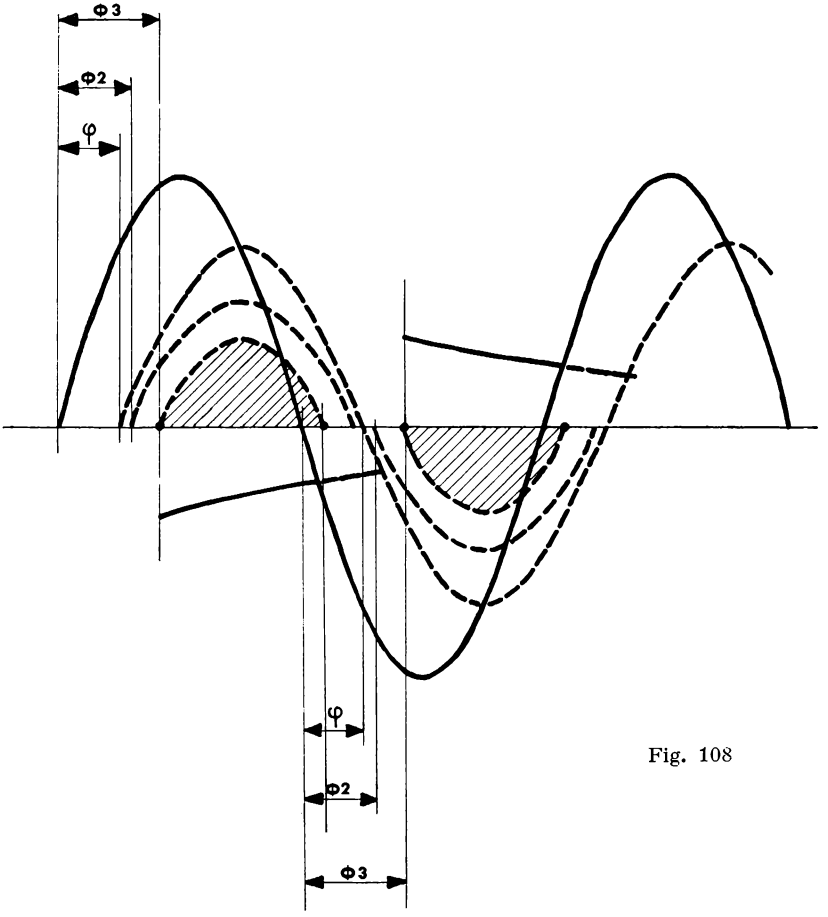


Fig. 108

L'APPAREIL ÉLECTRONIQUE SYNCHRONE

Pour réaliser un appareil électronique synchrone il faut disposer d'un contacteur ionique et allumer chaque ignitron à un angle de déphasage Φ égal ou supérieur à l'angle de déphase φ du circuit.

Pour $\Phi = \varphi$, la forme du courant est sinusoïdale. Pour $\Phi < \varphi$, nous obtenons, ainsi que le montre la figure 101, des courants transitoires que nous désirons éliminer.

C'est pourquoi l'angle Φ sera toujours égal ou supérieur à φ. Nous remarquons, figure 108, que pour des valeur Φ_2 et Φ_3, on obtient des courants transitoires inscrits à l'intérieur de la sinusoïde du courant et donc l'amplitude devient de plus en plus petite.

Nous en concluons qu'en déphasant de plus en plus le point d'allumage des ignitrons, nous limitons de plus en plus le courant qui parcourt le primaire du transformateur de soudage.

Nous trouvons ainsi le moyen de régler électroniquement et avec précision l'énergie développée dans le circuit de soudage, par le contrôle des courants transitoires.

En d'autres termes, le déphasage du point d'allumage des ignitrons permet le réglage électronique de la puissance de la machine à souder.

Nous décrivons ci-après et à titre d'exemple un appareil électronique synchrone. Il existe bien entendu plusieurs façons de réaliser des schémas permettant d'atteindre le synchronisme du déphasage.

Dans l'appareil que nous décrivons il est fait usage de thyratrons mais l'on peut également, ainsi que signalé précédemment, faire usage de transistors, décatrons, etc.

L'appareil électronique synchrone comprendra de toute façon les quatre éléments suivants :

— un circuit électronique d'allumage des tubes ignitrons en vue d'éliminer toute inertie qui rendrait une synchronisation impossible;
– - un circuit de synchronisation de l'allumage;
·— un circuit de déphasage;
— un circuit minuterie synchrone.

Considérons le schéma de la figure 109. L'amorçage de chaque tube ignitron Tu_1 et Tu_2 s'obtient en provoquant le passage d'une impulsion de courant entre l'igniteur et la cathode. Les impulsions sont contrôlées par des thyratrons de puissance Tu_3 et Tu_4 débitant jusqu'à 40 A.

Comme les deux tubes travaillent symétriquement, il suffit d'examiner le fonctionnement d'un seul.

On remarque que le thyratron Tu_3, par exemple, est branché en parallèle sur l'ignitron Tu_1 à travers le contact igniteur.

Supposons que l'on provoque l'allumage du thyratron Tu_3 à un instant donné au cours de la demi-période pendant laquelle son anode est positive. Un courant circulera traversant la résistance R_1 (destinée à limiter l'intensité), le thyratron Tu_3, le contact igniteur cathode de l'ignitron Tu_1, le primaire du transformateur de soudage et retournera par la ligne L_2.

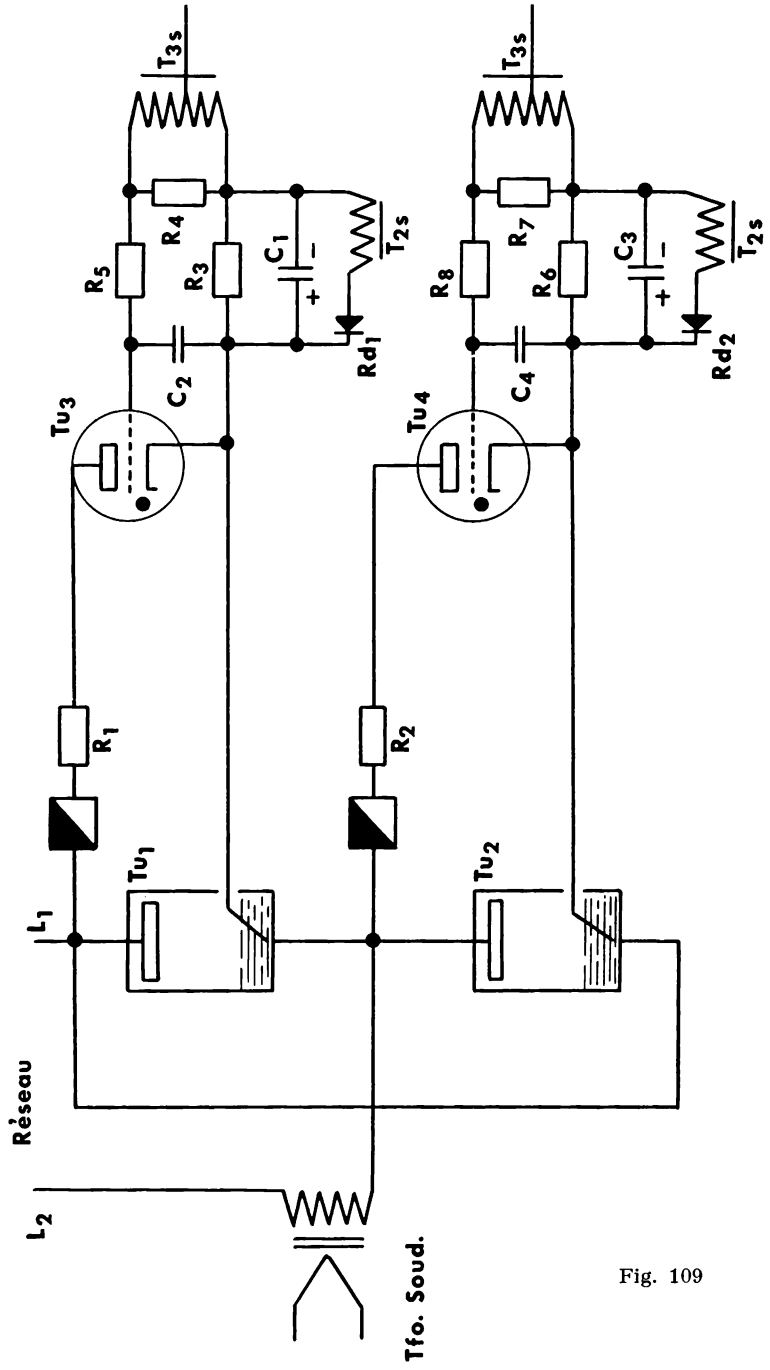

T3s
T3s
R4
R7
R5
R3
C1
R8
R6
C3
T2s
T2s
Rd1
Rd2
C2
C4
Tu3
Tu4
R1
R2
Tu1
Tu2
L1
Réseau
L2
Tfo. Soud.

Fig. 109

Du fait du passage du courant dans l'igniteur, l'ignitron s'amorce et se substitue au thyratron qui s'éteint immédiatement, la tension à ses bornes étant tombée à la valeur de la chute de tension dans l'arc de l'ignitron, soit une quinzaine de volts.

Le thyratron ne s'est donc allumé que pendant un court instant. Le courant débité par l'ignitron dépend, avons-nous vu, de l'instant d'allumage et celui-ci dépend de la valeur de la tension de grille du thyratron à ce moment.

La tension de grille du thyratron Tu_3 se compose de deux parties :

a) Une tension continue e_1 apparaissant en permanence aux bornes du condensateur C_1 shunté par une résistance R_3 et fournie par un petit redresseur sec Rd_1, alimenté par un secondaire T_{2s} d'un transformateur T_2. Cette tension continue rend négative la grille du thyratron de façon à le maintenir normalement éteint.

b) Une tension e_2 fournie par un secondaire T_{3s}, d'un transformateur T_3. Cette tension affecte la forme d'une fraction de demi-sinusoïde. La tension résultante de grille a la forme représentée à la figure 110. La tension e_2 est une partie réglable DBC de la sinusoïde représentée en pointillé. Quand elle apparaît, la grille du thyratron devient positive et le tube Tu_3 s'allume au point A : l'ignitron s'allume et le courant primaire de soudage continue à traverser celui-ci jusqu'à la fin de sa demi-période.

C'est en faisant varier le point A que l'on déphasera le point d'allumage de l'ignitron et que l'on réglera l'énergie développée dans le circuit de soudage.

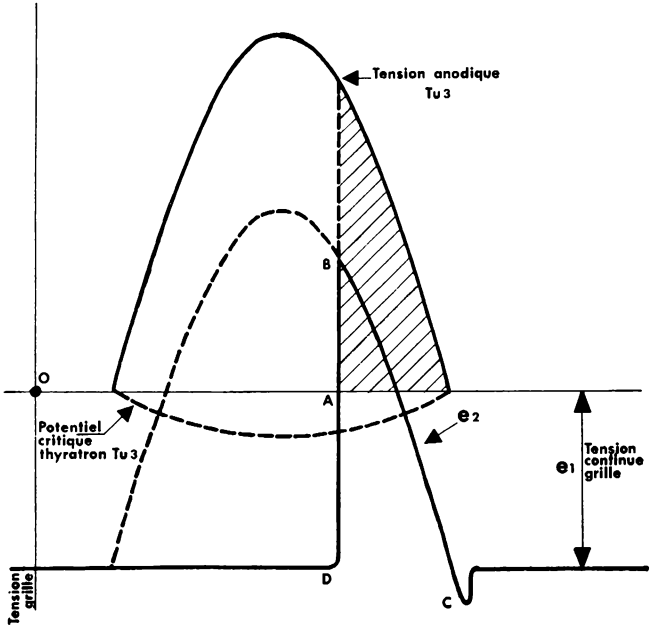


Fig. 110

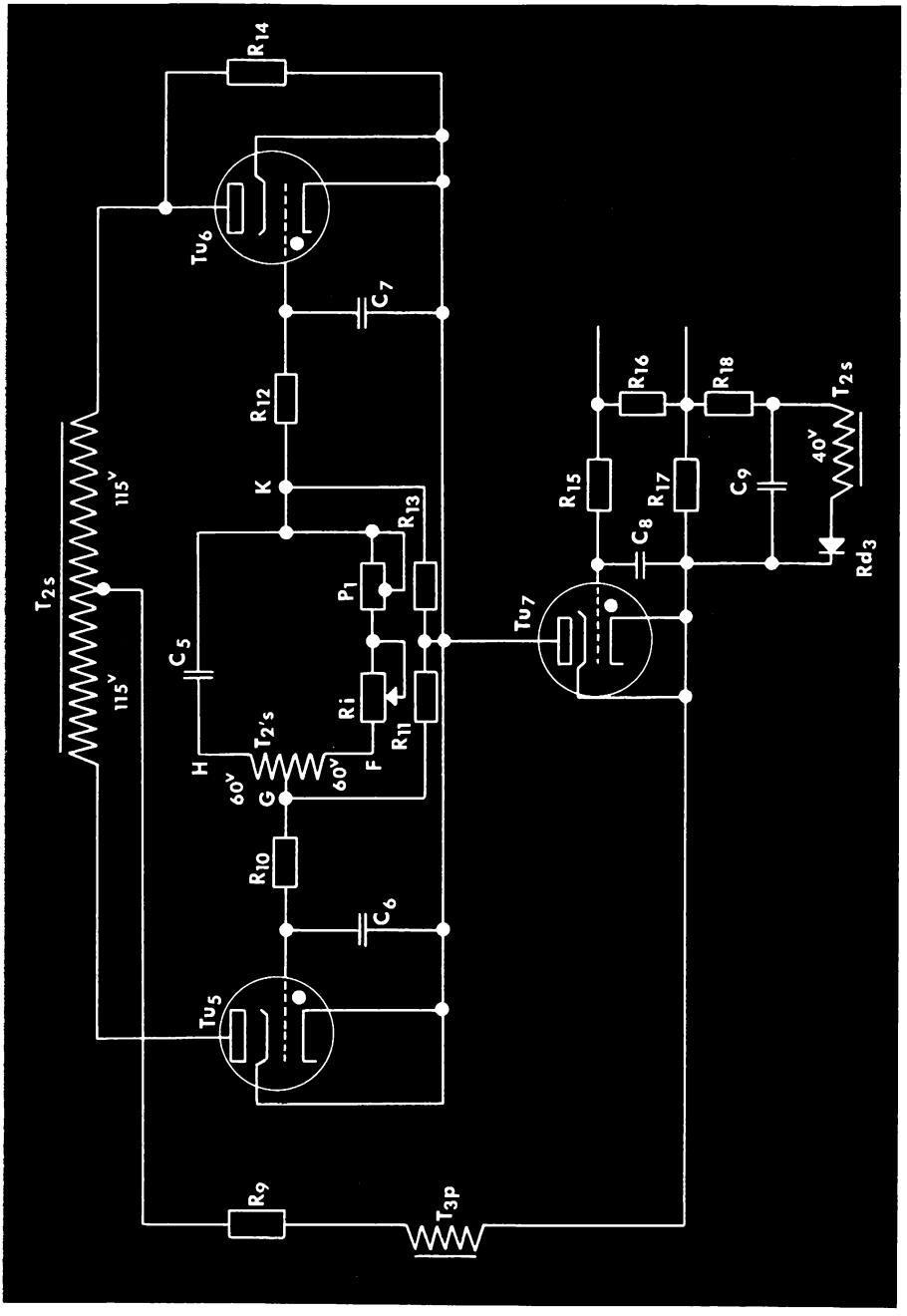

R14
Tu6
C7
R12
K
R13
P1
Ri
R11
T2's
H
60v
G
60v
F
R10
C6
Tu5
T2s
115v
115v
C5
R9
T3p
Tu7
R16
R18
T2s
R15
R17
C9
40v
C8
Rd3

Fig. 111

La tension e_2 est fournie par un dispositif représenté à la figure 111 et qui comporte deux thyratrons Tu_5 et Tu_6 montés en redresseur et alimentés par un secondaire T_{2s} d'un transformateur T_2 dont le primaire est alimenté par la tension du réseau; ce redresseur débite à travers une résistance R_9 et un transformateur T_3 en passant par un thyratron Tu_7 qui joue le rôle d'un interrupteur et dont le fonctionnement sera examiné plus loin.

Supposons pour l'instant que le thyratron Tu_7 soit court-circuité. On applique à la grille de chacun des thyratrons Tu_5 et Tu_6 une tension alternative déphasable. Ces deux tensions sont en opposition de phase l'une par rapport à l'autre, comme les tensions anodiques d'ailleurs.

Le circuit déphaseur est alimenté par un secondaire $T_2'_s$ à prise médiane du transformateur T_2, qui alimente une capacité C_5 en série avec une résistance variable qui se compose du rhéostat de réglage d'intensité Ri et d'un potentiomètre P dont le réglage se fait en fonction du facteur de puissance de la machine (déphasage φ). En faisant varier Ri on fait varier la phase de la tension entre les points G et K par rapport à la tension entre H et F, c'est-à-dire, également par rapport à la tension anodique de chacun des thyratrons puisque $T_2'_s$ et T_{2s} sont les secondaires d'un même transformateur T_2.

Le diagramme vectoriel, figure 112, explique clairement le principe de la tension déphasable.

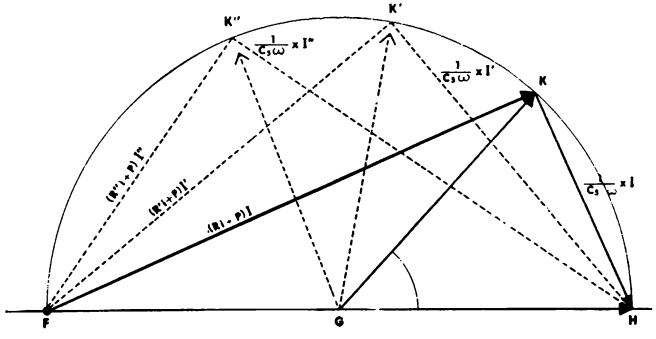


Fig. 112

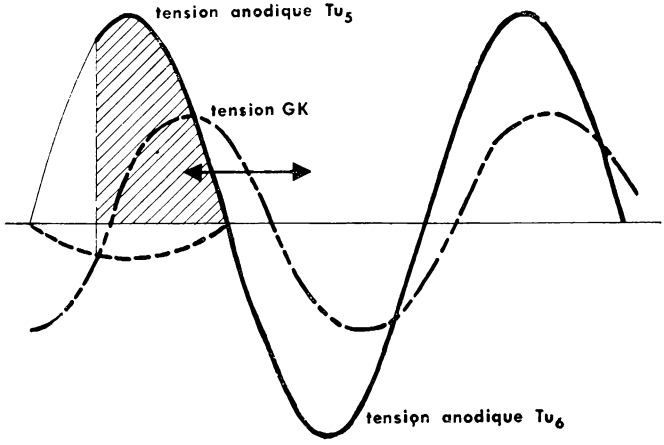


Fig. 113

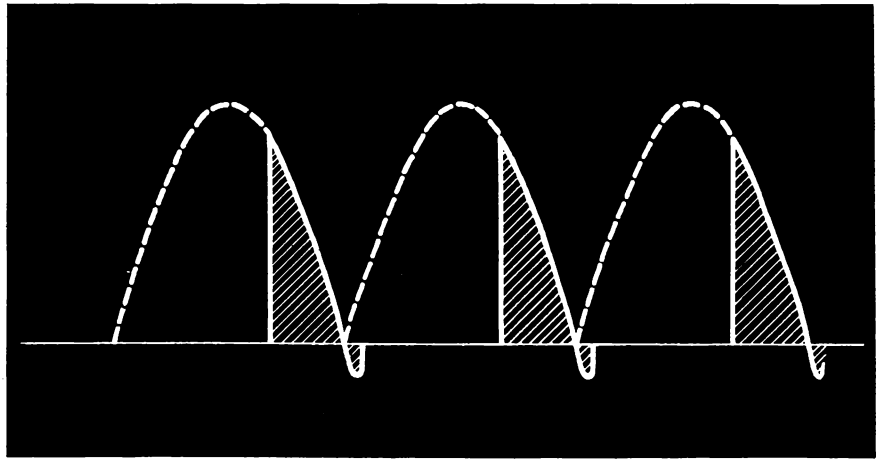


Fig. 114

La figure 113 montre la position de la sinusoïde de la tension GK par rapport à la tension anodique des thyratrons Tu_5 et Tu_6. Ceux-ci travaillant symétriquement à chaque alternance, la tension appliquée au primaire T_{3s} aura donc la forme indiquée à la figure 114 puisque les tubes Tu_5 et Tu_6 sont montés en redresseur.

La partie hachurée est variable selon le réglage du rhéostat Ri. Les tensions secondaires T_{3s} branchées dans le sens convenable rendront successivement positives les grilles des thyratrons Tu_3 et Tu_4 de la figure 109.

Ces tensions de grille n'apparaîtront que si le thyratron Tu_7 est conducteur. Son allumage est commandé par une tension provenant de la minuterie synchrone qui doit déterminer le temps de soudage.

La grille de Tu_7 est normalement polarisée négativement par la tension fournie par le petit redresseur Rd_3. Quand les impulsions de la minuterie apparaissent sur la grille, le tube s'allumera dès que Tu_5 débitera.

Grâce à la résistance R_{14} en parallèle sur Tu_6, le tube Tu_7 restera conducteur jusqu'à ce que Tu_6 soit débloqué à son tour. A la période suivante, les mêmes phénomènes se produisent jusqu'à ce que cessent les impulsions de commande.

Fig. 115

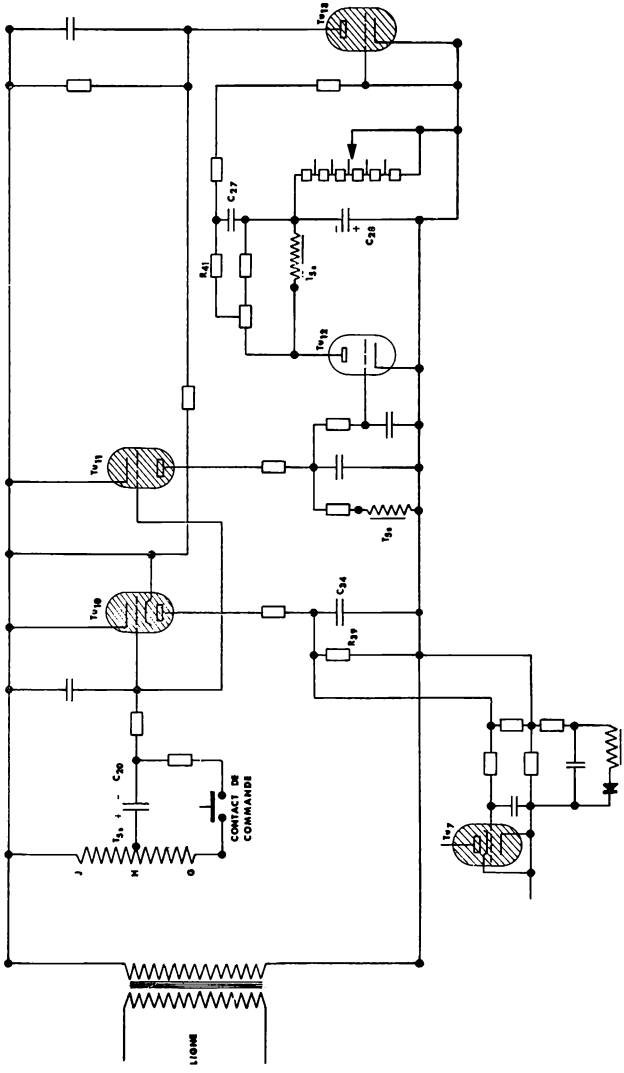

Tu18
C27
C28
R41
Ts1
Tu12
Tu11
Ts2
Tu10
C24
R39
C20
Ts3
J
M
O
CONTACT DE COMMANDE
Tu7
LIGNE

Fig. 116

Examinons pour terminer le principe d'une minuterie synchrone qui commande la grille de Tu_7.

Considérons la figure 116. Les tubes Tu_{10} et Tu_{11} sont maintenus éteints par une tension de grille fournie par l'enroulement JH du transformateur T_5 et redressée par le courant de grille de façon à charger C_{20}.

Cette tension est en opposition de phase avec l'anode.

Tu_{12} est allumé et maintient C_{28} chargé. Tu_{13} est bloqué par la tension continue aux bornes de C_{28}.

Quand on ferme le contact de commande, la tension continue aux bornes de C_{20} disparaît et une tension sinusoïdale pure apparaît aux bornes du condensateur C_{20} ; cette tension plus la tension JH du transformateur T_5, donnent une tension résultante qui est décalée vers l'avant par rapport à la tension d'anode. Les tubes Tu_{10} et Tu_{11} seront ainsi obligés de s'allumer au début de chaque période. Tu_{10} fournit les impulsions nécessaires pour débloquer le circuit de réglage d'intensité (Tu_7, fig. 111).

A chaque alternance, le condensateur C_{34} se charge. Il se décharge lentement à travers R_{39} lors de l'alternance pendant laquelle Tu_{10} ne fonctionne pas.

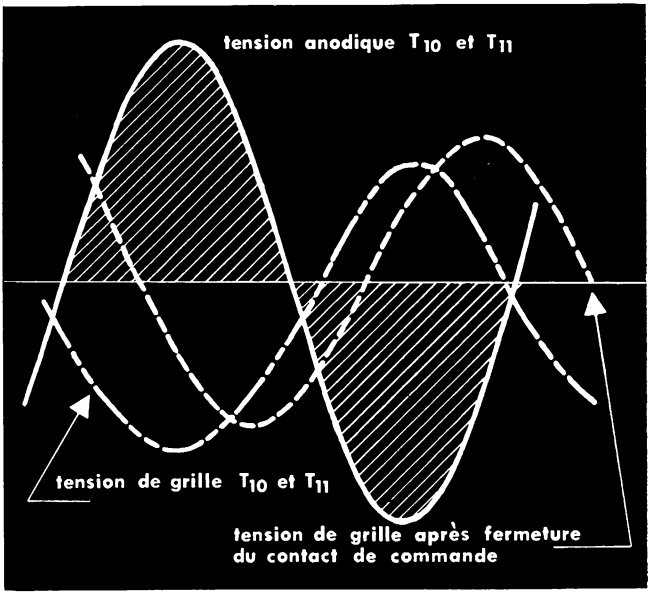


Fig. 117

La tension aux bornes de R_{39} est représentée figure 118. Elle a la forme d'une demi-sinusoïde prolongée par une constante de temps. Elle est en phase avec la tension anodique de Tu_5 (fig. 111).

La grille de Tu_7 (fig. 111) est normalement polarisée négativement par la tension fournie par le petit redresseur Rd_3. Quand les impulsions apparaissent le tube Tu_7 s'allume.

Le tube Tu_{11} s'allume en même temps que Tu_{10}. Il bloque le tube Tu_{12} en polarisant la grille négativement par une tension s'opposant à la tension T_{58}.

A l'instant où Tu_{12} est bloqué le condensateur C_{28} se décharge dans les résistances du combinateur selon une constante de temps.

Le circuit de grille du tube Tu_{13} comporte une tension alternative déphasée en avant par R_4 et C_{27} qui oblige le tube à s'allumer dès le début de la période.

La tension de C_{28} est en série avec cette tension. Quand C_{28} sera suffisamment déchargé, Tu_{13} s'allumera et bloquera Tu_{10} par la grille écran, ce qui supprime les impulsions transmises à Tu_7 soit au circuit d'intensité et supprime par conséquent les impulsions de soudure. La position du combinateur dans les résistances duquel C_{28} se décharge, détermine donc le temps de passage du courant de soudage.

Pour effectuer une seconde soudure, il sera nécessaire d'ouvrir le contact de commande pour remettre le circuit à l'état initial et de le réenclencher.

Le but que nous poursuivions était de donner une idée de la précision avec laquelle on peut assurer le contrôle du courant de soudage.

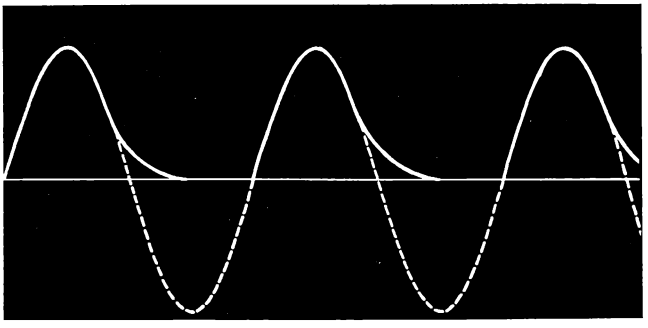


Fig. 118

L'appareil synchrone décrit est le plus simple au point de vue fonctions. Nous énumérons ci-après quelques types d'appareils permettant de contrôler plusieurs paramètres de soudage. Il suffit qu'on en connaisse l'existence. On trouve la plus grande variété d'appareils électroniques de contrôle en soudage par points. Les appareils électroniques pour machines à souder au galet sont relativement simples. Ils fournissent les impulsions de soudage et de repos nécessaires à l'obtention des points superposés d'une soudure étanche, ou discontinue. Pour le soudage en bout on a surtout besoin d'un contacteur ionique, mais il se peut que pour le soudage d'aciers spéciaux, on fasse emploi d'appareils contrôlant le courant de refoulement par déphasage et permettant en plus de réaliser un refroidissement contrôlé ou encore un recuit par des courants dont l'intensité est réglée par déphasage.

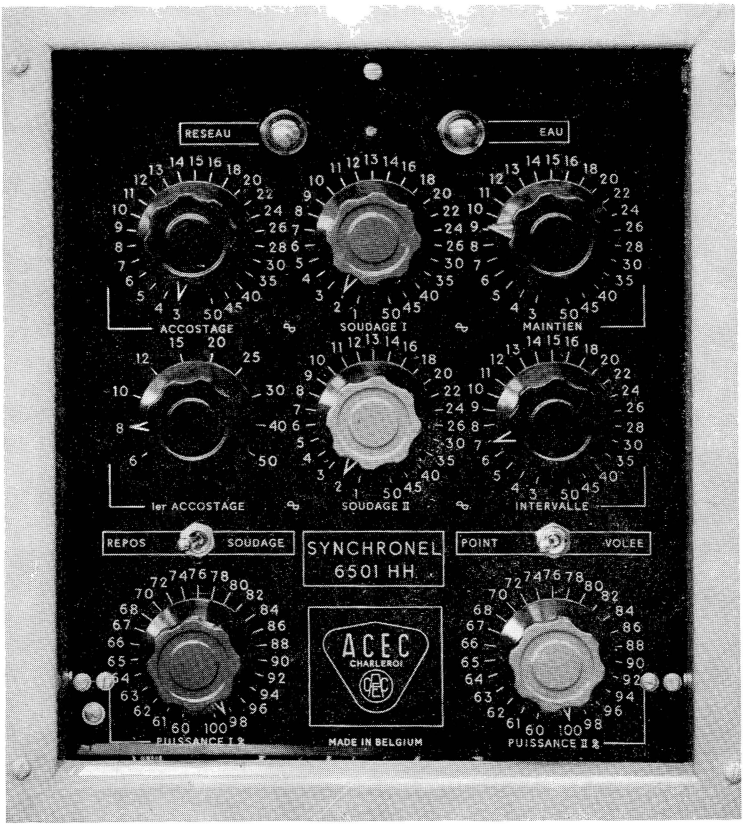


Fig. 119
Appareil synchrone

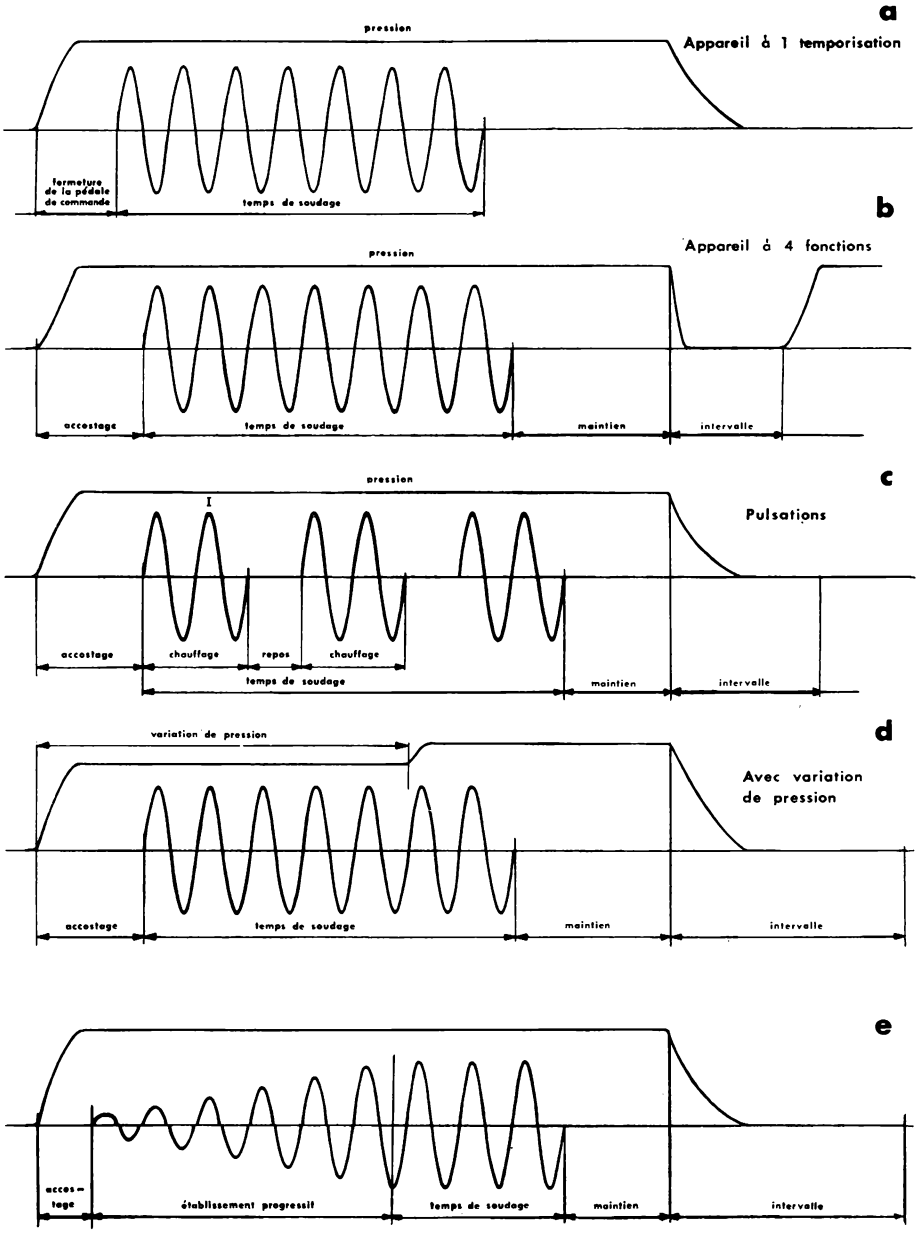

a
pression
Appareil à 1 temporisation
fermeture de la pédale de commande
temps de soudage
b
pression
Appareil à 4 fonctions
accostage
temps de soudage
maintien
intervalle
c
pression
I
Pulsations
accostage
chauffage
repos
chauffage
temps de soudage
maintien
intervalle
d
variation de pression
Avec variation de pression
accostage
temps de soudage
maintien
intervalle
e
accos-tage
établissement progressif
temps de soudage
maintien
intervalle

Fig. 120

Figure 120 *a* : Représente le cycle d'un appareil à simple fonction : le contrôle du temps de soudage. Pour mieux situer les différentes phases du cycle de soudage nous avons représenté la pression sur les pièces à souder durant le cycle.

Figure 120 *b* : cycle à quatre fonctions : accostage, soudage, maintien et intervalle. Quelques instants après avoir commandé l'accostage, les électrodes atteignent les pièces à souder et exercent une pression déterminée. Viennent ensuite le temps de passage du courant de soudage et le temps de forgeage de la soudure ou maintien sous pression des électrodes. En cas de manœuvre répétée automatiquement (soudage à la volée) le cycle recommence après un temps d'intervalle réglable.

Figure 120 *c* : exemple d'un cycle de soudage avec impulsions de courant. Cette séquence est employée, comme dit précédemment, pour le soudage de fortes épaisseurs afin d'assurer un chauffage uniforme des pièces à souder ou dans le cas d'aciers susceptibles de trempe à l'air, dans le but de diminuer la vitesse de refroidissement.

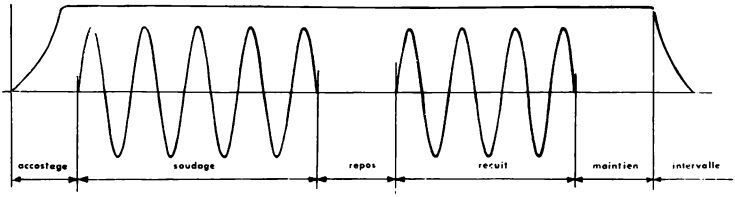
Figure 120 *d* : exemple d'un cycle normal à quatre temps, mais où intervient une variation de pression après un temps également réglable électroniquement et commençant à compter à partir du démarrage de l'opération. Le cycle à variation de pression s'emploie, d'une part pour augmenter la résistance de contact à l'accostage, d'autre part, pour assurer un forgeage plus efficace en fin de soudure. On en fait également usage pour le soudage par bossage dans le but d'éviter l'affaissement des bossages sous l'effet mécanique de la pression et cela déjà avant le passage du courant de soudage.

Figure 120 *e* : cycle avec établissement progressif du courant de soudage. L'établissement progressif du courant d'une valeur faible à la valeur normale présélectionnée se réalise en un nombre de périodes réglable. Il s'obtient par une variation automatique du déphasage du point d'allumage des ignitrons. L'avantage de l'établissement progressif du courant (appelé également « slope ») est notable dans le cas du soudage par point d'alliages légers. Grâce à l'échauffement progressif, les électrodes bombées augmentent progressivement leur surface de contact avec les tôles à souder et la densité du courant à l'endroit du passage reste admissible. On limite ainsi dans de fortes mesures le phénomène de « pick up » ou encrassement de l'électrode par un alliage entre le cuivre de l'électrode et l'aluminium.

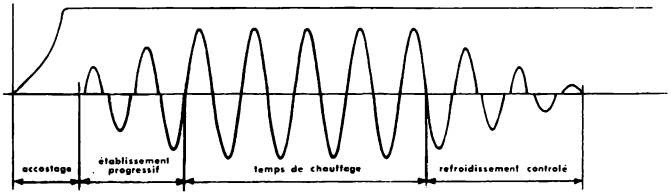
L'établissement progressif du courant peut également être utilisé dans le cas du soudage par bossage dans le but de provoquer, avant le passage du courant de soudage, l'égalisation de la hauteur des bossages.

Enfin, l'établissement progressif du courant peut également faire fonction d'un préchauffage dans le cas du soudage d'aciers spéciaux ou alliés où toute surchauffe brusque est néfaste du point de vue métallurgique.

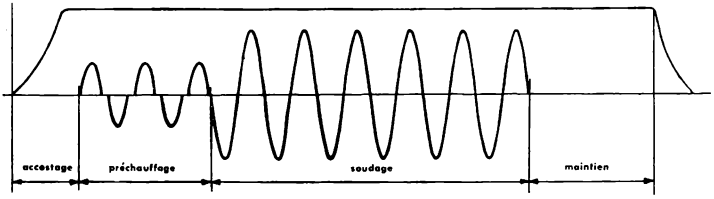
f


accostage
soudage
repos
recuit
maintien
intervalle

g


accostage
établissement progressif
temps de chauffage
refroidissement contrôlé

h


accostage
préchauffage
soudage
maintien

k

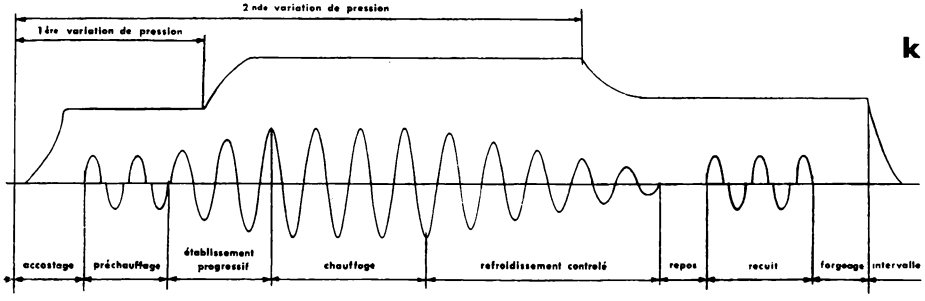

2 nde variation de pression
1ère variation de pression
accostage
préchauffage
établissement progressif
chauffage
refroidissement contrôlé
repos
recuit
forgeage
intervalle

Fig. 120

Figure 120 *f* : passage normal du courant de soudage suivi, après un temps réglable d'un courant de recuit réglable en intensité et en temps. L'emploi de cette séquence est recommandée dans le cas du soudage d'aciers autotrempants, ou même de certains alliages légers.

Figure 120 *g* : cycle de soudage avec établissement progressif du courant et refroidissement contrôlé. Ces deux fonctions s'obtiennent par déphasage automatique du point d'allumage des ignitrons. La durée de l'établissement et du refroidissement contrôlé est réglable indépendamment. Le refroidissement contrôlé limite la vitesse de refroidissement de la zone soudée et environnante et est par conséquent à recommander dans le cas du soudage d'aciers autotrempants ou d'acier où une très grande vitesse de refroidissement provoque des précipitations que l'on ne désire pas. Par exemple, certains aciers inoxydables.

Figure 120 *h* : exemple d'un cycle à courant de préchauffe.

Figure 120 *k* : exemple d'une séquence combinant plusieurs des possibilités énumérées ci-dessus.

Remarquons qu'il est possible d'imaginer encore nombre d'autre séquences s'adaptant à un problème bien particulier. Ajoutons que les appareils électroniques peuvent être triphasés dans le cas du contrôle de machines triphasées soit à courant de soudage redressé ou à basse fréquence. Dans ce dernier cas, c'est même l'allumage des ignitrons dans un ordre bien établi qui permet d'obtenir des fréquences inférieures à la fréquence industrielle.

Pour terminer, mentionnons que les appareils électroniques peuvent être équipés d'une régulation automatique d'intensité et de compensation de tension éliminant toutes les irrégularités du cycle et qui pourraient provenir soit de variations du courant de soudage dues à l'introduction de masses magnétiques dans le circuit secondaire ou de variation de conditions superficielles des pièces à souder, soit aussi de variations de tension qui viendraient du réseau d'alimentation.

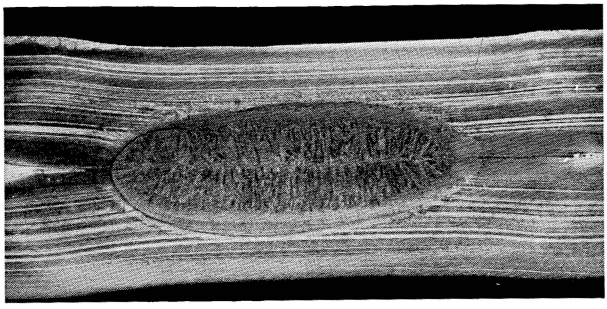


Fig. 121
Macrographie d'un point soudé assemblant deux tôles (assemblage à simple recouvrement).

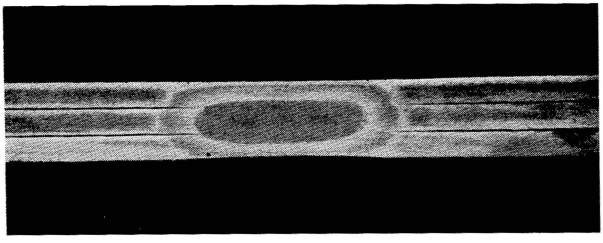


Fig. 122
Macrographie d'un point soudé assemblant deux tôles couvrantes sur une tôle couverte (assemblage à double recouvrement). Les trois tôles ont même épaisseur; elles sont en duralumin.

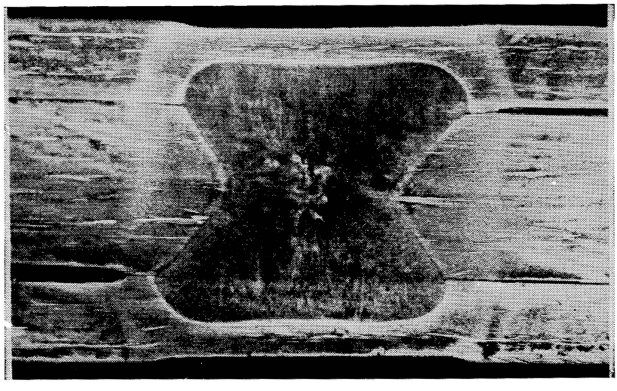


Fig. 123
Macrographie d'un point soudé assemblant deux tôles couvrantes sur une tôle couverte plus épaisse. Les trois tôles sont en acier doux laminé.

RÉSISTANCE MÉCANIQUE DES POINTS DE SOUDURE *

On a vu que, lorsqu'il est pressé entre deux électrodes à haute conductivité électrique, le joint de deux tôles moins conductrices s'échauffe par effet Joule; si la chauffe est suffisamment brusque, le métal est fondu au joint et, après refroidissement, les deux tôles sont assemblées par ce que l'on appelle un point soudé (fig. 124 et macrographie, fig. 121); le joint obtenu est du type à simple recouvrement (fig. 127) ou à simple couvre-joint (fig. 128).

En pressant trois tôles entre deux électrodes, on obtient un double point soudé (fig. 125 et 126 et macrographies, fig. 122 et 123); dans ce cas, le joint obtenu est du type à double recouvrement (fig. 129) ou à double couvre-joint (fig. 130).

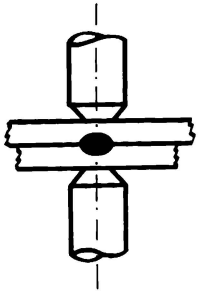


Fig. 124

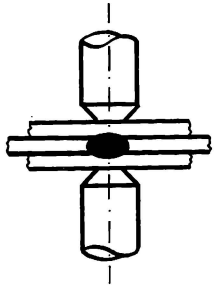


Fig. 125

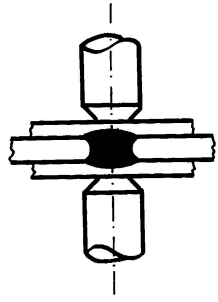


Fig. 126

Assemblages :

Fig. 127
à simple recouvrement

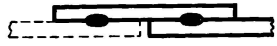


Fig. 128
à simple couvre-joint

Fig. 129
à double recouvrement

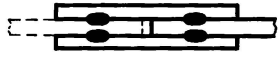


Fig. 130
à double couvre-joint.

* Sous ce titre, les pages suivantes ont été rédigées par Lucien VANDEPERRE, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, suite aux travaux de recherche réalisés grâce à l'appui du FNRS de l'IRSIA, sous le patronage de l'Institut Belge de la Soudure et à l'initiative de la SA Electromécanique.

Analogie entre les assemblages soudés par points et les assemblages rivés ou boulonnés.

Ainsi donc, on peut réaliser par points des assemblages analogues à ceux que l'on réalise couramment au moyen de rivets ou de boulons.

Par un examen plus attentif, on constate que cette analogie de forme ne se borne pas à l'aspect général des assemblages : elle s'étend aux principes mêmes sur lesquels est basée leur résistance aux efforts extérieurs. En effet, pour obtenir avec un point soudé l'équivalent d'un assemblage rivé ou boulonné, il suffit d'isoler par une coupe dans les tôles un cylindre au diamètre du point et de souder deux têtes de rivets ou deux écrous à ce cylindre (fig. 131 et 133).

Un point soudé est donc analogue à un rivet sans tête ou à un boulon sans écrou dont le corps serait soudé aux tôles sur toute la périphérie du trou. Il en est de même d'ailleurs pour les faux-rivets dans les assemblages par soudure avec métal d'apport (fig. 134). Dans les assemblages par faux-rivets, appelés aussi soudures à bouchons, on soude une tôle, percée d'un trou circulaire, sur la face d'une pièce, en remplissant le trou avec du métal d'apport.

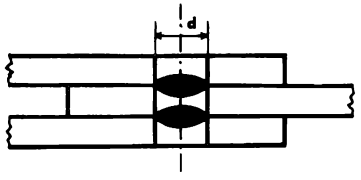


Fig. 131
Analogie de forme entre les assemblages.

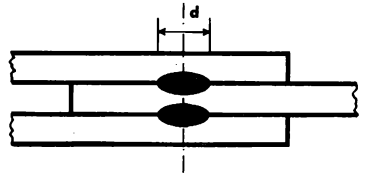


Fig. 132
par points.

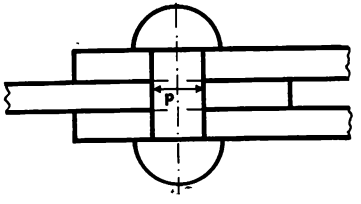


Fig. 133
par rivets ou bouchons

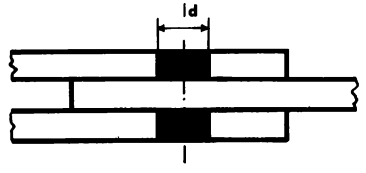


Fig. 134
par faux-rivets ou bouchons.

L'analogie de forme et son influence sur la résistance comparée des assemblages par rivets, par boulons, par points soudés ou par faux-rivets.

Cette analogie de forme entre les assemblages rivés ou boulonnés d'une part et les assemblages soudés par points ou par faux-rivets d'autre part est fondamentale pour le calcul de ces derniers parce qu'elle explique le mécanisme de leur résistance aux efforts de cisaillement.

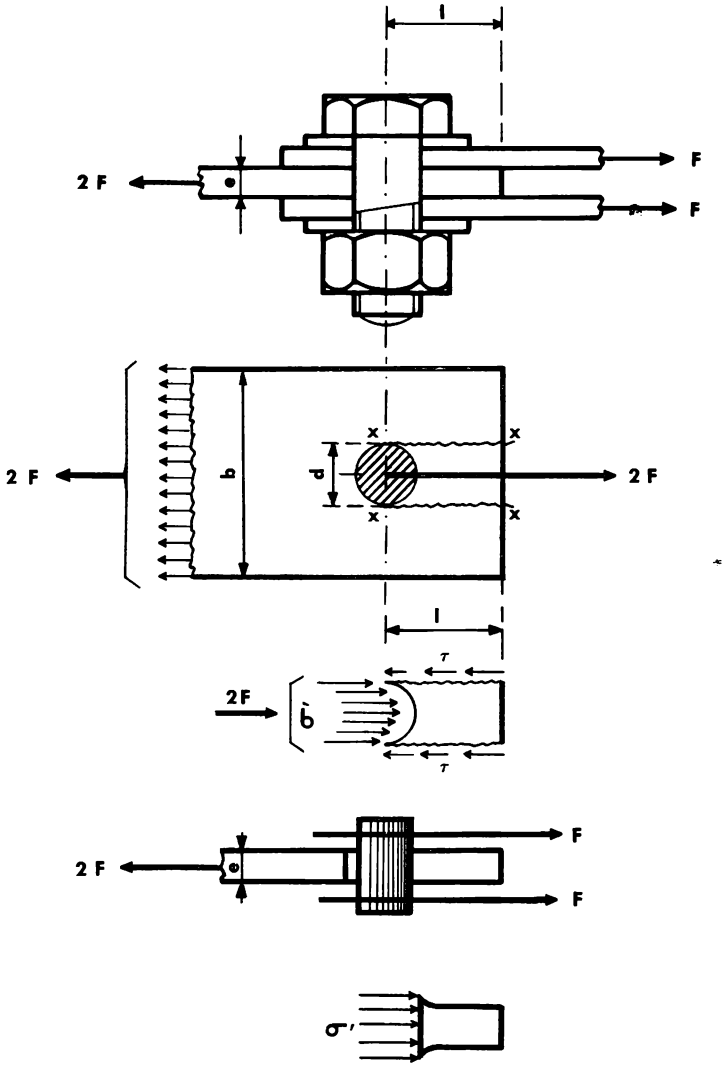


Fig. 135

En effet, lorsqu'il est soumis à un effort de cisaillement 2 F, le corps du rivet ou du boulon comprime la tranche de la tôle à la périphérie du trou dans la direction de l'effort (fig. 135).

Cette compression σ' tend, elle-même, à cisailler la tôle parallèlement à l'effort F, suivant les sections xx de part et d'autre du trou.

Enfin, cette même compression σ' tend à rompre la tôle par traction sur section nette, c'est-à-dire sur la section transversale à l'effort et passant par le centre du trou.

Faisant croître l'effort 2 F, on obtiendra finalement :

— Soit la rupture par traction sur section nette si la tôle est étroite et mince (fig. 136);

— Soit la rupture par cisaillement de la tranche de la tôle suivant les sections xx si le recouvrement l est suffisamment petit, la tôle étant suffisamment mince et large (fig. 137 et 138);

— Soit la rupture par compression sur la tranche de la tôle et déchirure subséquente si le recouvrement l est suffisamment grand, la tôle étant suffisamment mince et large (fig. 139 et 140);

— Soit, enfin, la rupture par cisaillement du rivet ou du boulon si la largeur et l'épaisseur de la tôle ainsi que le recouvrement l sont suffisants.

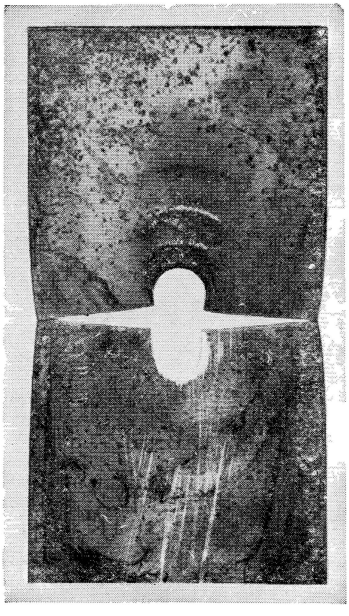


Fig. 136
Assemblage à double recouvrement boulonné (fig. 135), plat couvert rompu par traction sur section nette.

Fig. 137

Fig. 138

Assemblage à double recouvrement, boulonné (fig. 135) : plat couvert rompu par cisaillement sur tranche.

Fig. 139

Assemblage à double recouvrement, boulonné (fig. 135) : plat couvert rompu par compression sur corps.

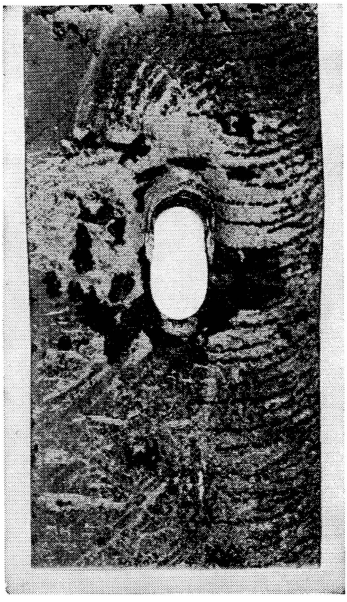


Fig. 139 *a*

Fig. 139 *b*

Progression au cours de l'essai, du refoulement du plat par la compression du boulon; ovalisation croissante du trou.

Fig. 139 *c*

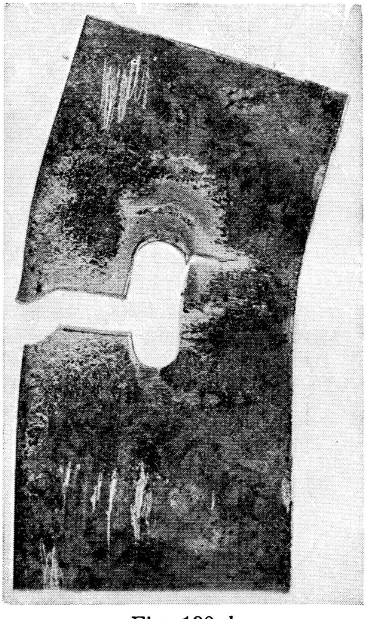


Fig. 139 *d*

Assemblages à double recouvrement, boulonnés : rupture mixte des plats couverts (compression sur corps et traction sur section nette).

Fig. 140
La tranche du plat couvert de la figure 139 : la tôle est refoulée par la compression du boulon.

De même, lorsqu'il est soumis à l'effort de cisaillement 2 F, le point soudé, à sa périphérie, comprime la tranche de la tôle dans la direction de l'effort, mais, en plus, il la soumet à traction dans la direction opposée (fig. 141).

Par ailleurs, comme pour les rivets et les boulons, la compression sur tranche tend à cisailler la tôle suivant les sections xx de part et d'autre du point; elle tend aussi à la rompre par traction mais, la tôle n'étant pas trouée, aucune section déforcée ne localisera cette rupture éventuelle.

Faisant croître l'effort 2 F, on obtiendra finalement :

— Soit la rupture par traction de la tôle si celle-ci est étroite et mince;
— Soit la rupture par cisaillement de la tranche de la tôle suivant les sections xx et par traction à l'arrière du point si le recouvrement l est suffisamment petit, la tôle étant suffisamment mince et large (photos des fig. 142 à 144);
— Soit la rupture par compression sur la tranche de la tôle à l'avant du point, en même temps qu'à l'arrière la tôle se rompt par traction et, latéralement, par cisaillement; ce mode de rupture se produira pour des recouvrements l suffisamment grands, la tôle étant suffisamment mince et large (photo de la fig. 145).
— Soit, enfin, la rupture par cisaillement du point soudé si la largeur et l'épaisseur de la tôle ainsi que le recouvrement l sont suffisants (photo de la fig. 146).

Tout ce qu'on vient de dire au sujet des assemblages par points est applicable sans restriction aux assemblages par faux-rivets.

Ainsi, le mécanisme de la résistance de ces deux modes d'assemblage s'explique par leur analogie avec les assemblages rivés ou boulonnés.

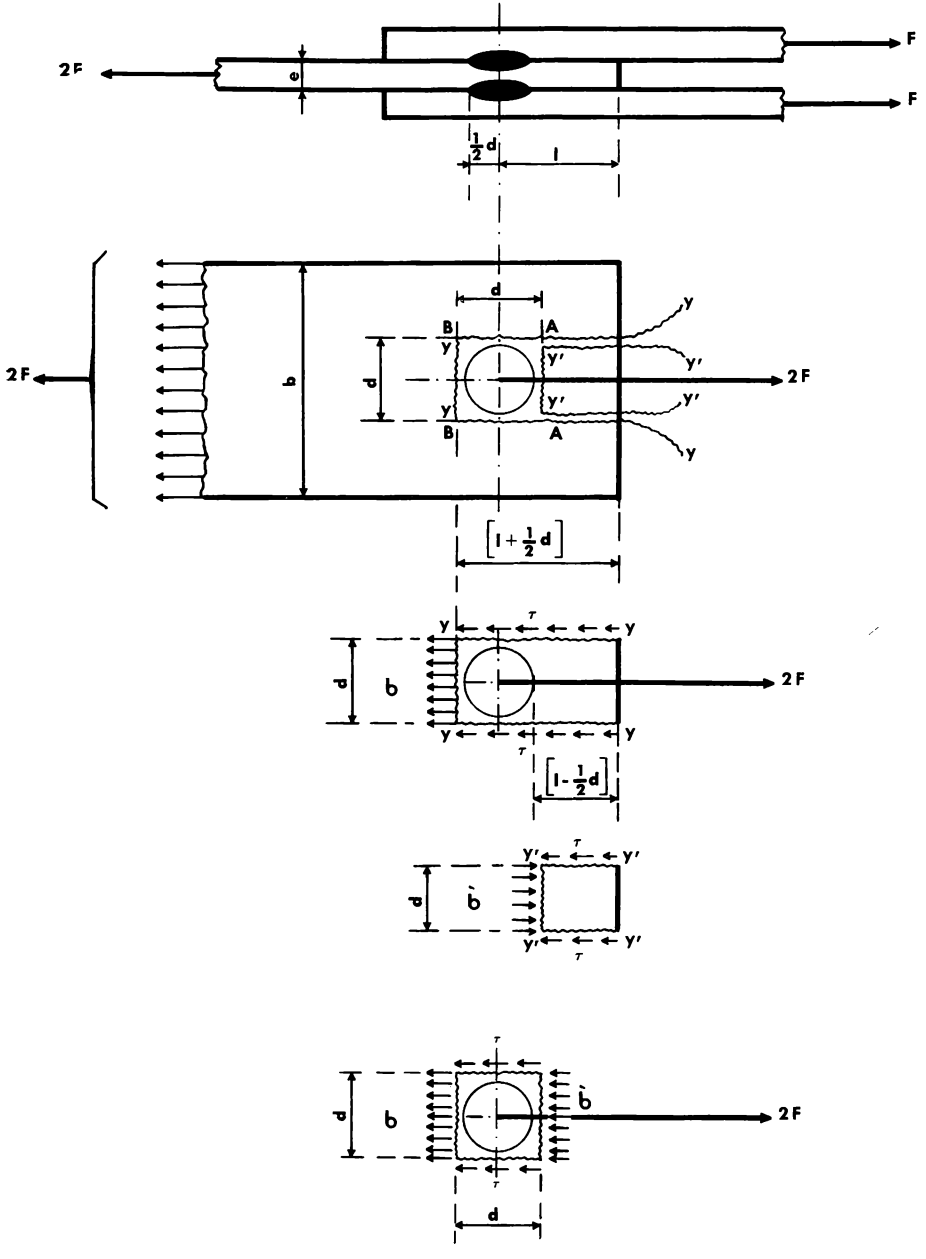


Fig. 141

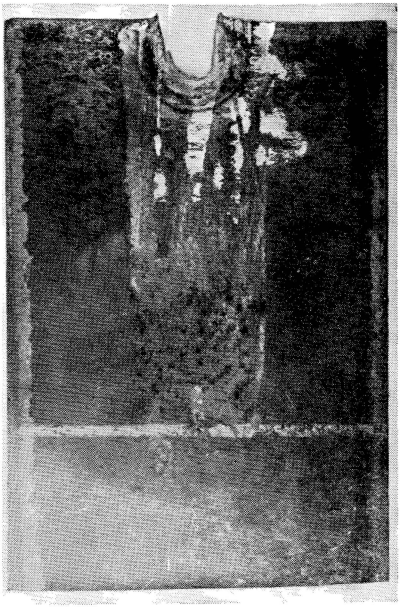


Fig. 142

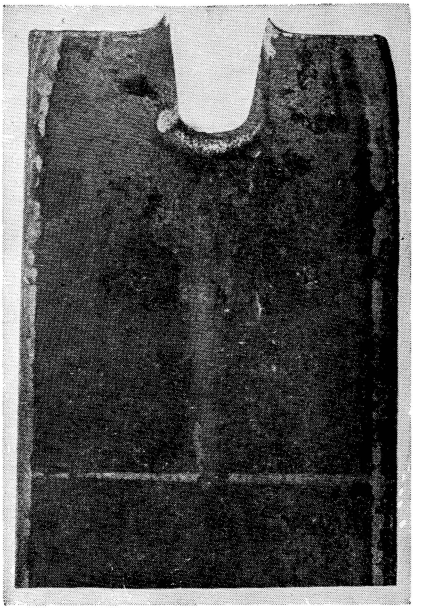


Fig. 143

Assemblage à double recouvrement soudé par points (fig. 141)
plat couvert rompu par cisaillement sur tranche.

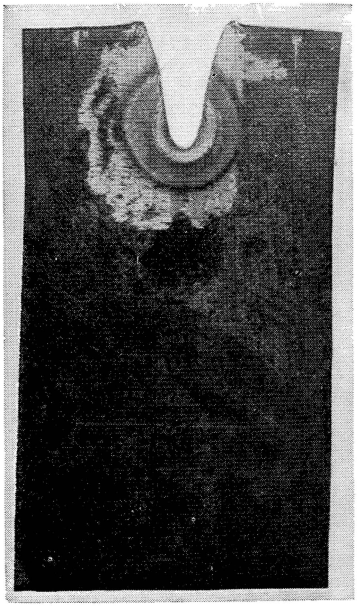


Fig. 144

Fig. 145
Assemblage à double recouvrement soudé par points (fig. 141) : plat couvert rompu par compression sur corps.

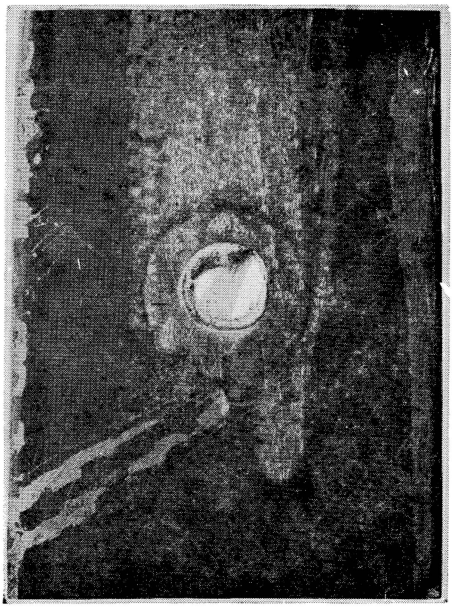


Fig. 146

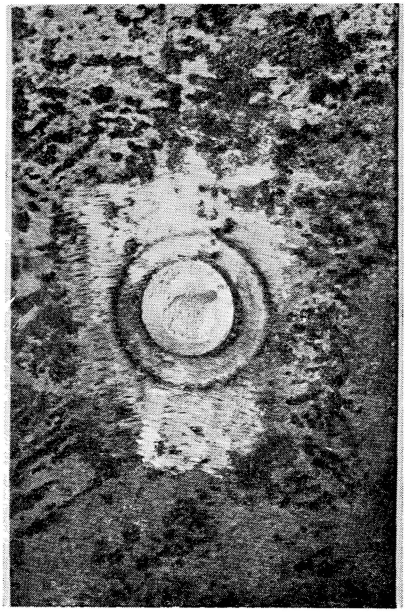


Fig. 146 *a*

Assemblage à double recouvrement soudé par points (fig. 141); rupture par cisaillement des points

Les quatre constantes fondamentales du calcul des assemblages rivés ou boulonnés, les cinq constantes fondamentales du calcul des assemblages soudés par points ou par faux-rivets.

1. Les assemblages rivés ou boulonnés.

Si l'on écrit les équations d'équilibre correspondant aux divers modes de rupture précédemment décrits pour les assemblages rivés ou boulonnés, on constate que l'effort de rupture $2\ F_r$ est égal à la plus petite des quatre valeurs suivantes :

$$(2\ F_r)_1 = (b\text{-}d)\ \mathrm{e}\ R_a$$

$$(2\ F_r)_2 = 2\ l\ \mathrm{e}\ R''$$

$$(2\ F_r)_3 = \mathrm{d}\ \mathrm{e}\ (R' + R'') = \mathrm{d}\ \mathrm{e}\ R'_c$$

$$(2\ F_r)_4 = 2\ \frac{\pi\ \mathrm{d}^2}{4}\ R''_b$$

en désignant par :

R_a la résistance de la tôle à la traction sur section nette pour les assemblages boulonnés ou rivés, sur section brute pour les assemblages soudés par points ou par faux-rivets;

R' sa résistance à la compression sur tranche,

R'' sa résistance au cisaillement par tranche;

R''_b la résistance du rivet ou du boulon au cisaillement.

Il est à noter que, dans la pratique courante, pour le calcul de $(2\ F_r)_3$, on remplace la somme $(R' + R'')$ par un symbole unique R'_c que l'on appelle résistance à la compression sur le corps du rivet ou du boulon; cette résistance à la compression sur corps est donc égale à la résistance de la tôle à la compression sur tranche augmentée de sa résistance au cisaillement sur tranche :

$$R'_c = R' + R''.$$

2. Les assemblages soudés par points et par faux-rivets.

Ecrivant pour les assemblages soudés par points ou par faux rivets les équations d'équilibre correspondant aux divers modes de rupture, on constate que l'effort de rupture $2\ F_r$ est égal à la plus petite des quatre valeurs suivantes :

$$(2\ F_r)_1 = b\ e\ R_a$$

$$(2\ F_r)_2 = 2\left(l + \frac{d}{2}\right) e\ R'' + d\ e\ R'$$

$$(2\ F_r)_3 = d\ e\ (R' + 2\ R'' + R)$$

$$(2\ F_r)_4 = 2\ \frac{\pi\ d^2}{4}\ R''_p$$

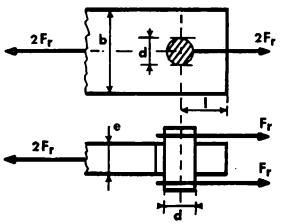
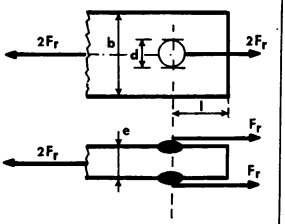
expressions dans lesquelles apparaissent deux résistances nouvelles :

R la résistance de la tôle à la traction localisée à l'arrière du point ou du faux-rivet, et évidemment :

R''_p la résistance du point ou du faux-rivet au cisaillement, résistance qui n'est pas forcément égale à celle des rivets et des boulons.

Il est à noter que, comme dans le calcul des assemblages rivés ou boulonnés, on peut remplacer dans $(2\ F_r)_3$ la somme $(R' + 2\ R'' + R)$ par un symbole unique R'_c que l'on peut appeler : résistance à la compression sur le corps du point soudé ou du faux-rivet; pour ceux-ci donc, la résistance à la compression sur corps est égale à la résistance de la tôle à la compression sur tranche, augmentée de sa résistance à la traction sur tranche à l'arrière du point ou par faux-rivet et de deux fois sa résistance au cisaillement sur tranche :

$$R'_c = R' + 2\ R'' + R.$$

Plat couvert assemblé par :		Rupture par :
boulon ou rivet	points soudés ou faux-rivets	
		
$2F_r$ est égale à la plus petite des quatre valeurs suivantes :	$2F_r$ est égale à la plus petite des quatre valeurs suivantes :	
$(2F_r)_1 = (b - d)\ e\ R_a$	$(2F_r)_1 = be\ R_a$	traction sur section nette.
$(2F_r)_2 = 2\ l\ e\ R''$	$(2F_r)_2 = 2(l + \frac{d}{2})\ e\ R'' + de\ R$	cisaillement sur tranche.
$(2F_r)_3 = de(R' + R'') = de\ R'_c$	$(2F_r)_3 = de(R' + 2R'' + R)$	compression sur corps.
$(2F_r)_4 = 2\ \frac{lbd^2}{4}\ R''_b$	$(2F_r)_4 = 2\ \frac{lbd^2}{4}\ R''_p$	cisaillement du rivet ou du boulon, du point soudé ou du faux-rivet.

3. La valeur des équations d'équilibre de rupture posées précédemment.

Les huit équations d'équilibre de rupture posées précédemment sont vraies sans restriction et dans tous les cas, si l'on suppose a priori que les résistances R sont des variables dépendant non seulement du métal constituant, mais aussi des dimensions b, c, d et l de l'assemblage. Et, effectivement, les théories de l'élasticité et les mesures de photo-élasticimétrie prouvent qu'il en est bien ainsi dans les limites de proportionnalité.

A la rupture, ces théories et ces mesures expérimentales ne sont plus valables, même pour les métaux durs et surtout pour les métaux ductiles.

Dans ces conditions, seuls des essais de rupture peuvent renseigner sur la valeur des résistances R : ce sont donc des essais de rupture que nous avons effectués pour déterminer celles-ci.

4. Considérations générales sur la valeur des efforts de rupture des assemblages en fonction des résistances R.

Avant d'examiner les résultats de ces essais, il convient de remarquer a priori que si les résistances R sont des constantes spécifiques, caractéristiques de la matière, indépendantes des dimensions des éprouvettes :

— l'effort de rupture $(2\ F_r)_1$ est proportionnel à la section nette $(b - d)\ e$ de la tôle rivée ou boulonnée ou à la section brute $b\ a$ de la tôle soudée, le diagramme de cet effort en fonction de cette section est donc rectiligne et il part de l'origine (fig. 147);

— l'effort de rupture $(2\ F_r)_2$ est proportionnel au recouvrement l pour la tôle rivée ou boulonnée et son diagramme en fonction de ce recouvrement est rectiligne et part de l'origine (fig. 148);

— l'effort de rupture $(2\ F_r)_2$ croît linéairement en fonction du recouvrement l pour les tôles soudées, en partant d'une valeur origine; son diagramme en fonction de l est donc rectiligne et part de cette ordonnée à l'origine (fig. 149);

— l'effort de rupture $(2\ F_r)_3$ est indépendant du recouvrement pour les tôles rivées, boulonnées ou soudées;

— ces efforts de rupture $(2\ F_r)_2$ et $(2\ F_r)_3$ sont, dans tous les cas, proportionnels à l'épaisseur de la tôle et, en outre, $(2\ F_r)_3$ est proportionnel au diamètre d des rivets, boulons, points soudés ou faux-rivets;

— l'effort de rupture $(2\ F_r)_4$ est, dans tous les cas, proportionnel aux sections cisaillées et son diagramme en fonction de ces sections est rectiligne en partant de l'origine (fig. 150).

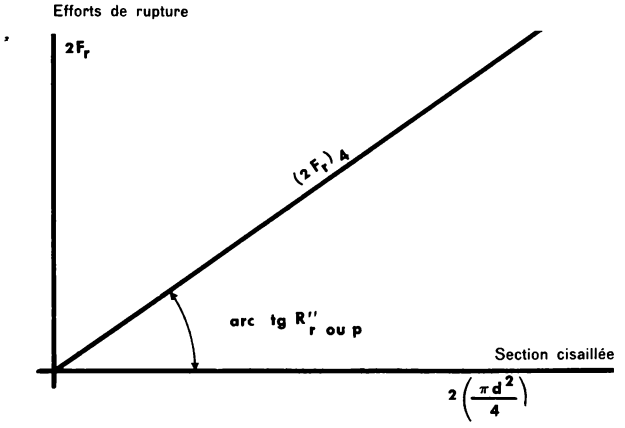


Fig. 147
Assemblages rivés ou boulonnés, soudés par points ou par faux-rivets.

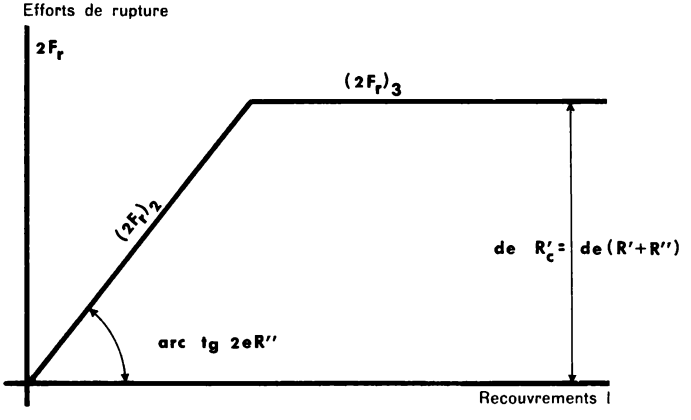


Fig. 148
Assemblages rivés ou boulonnés.

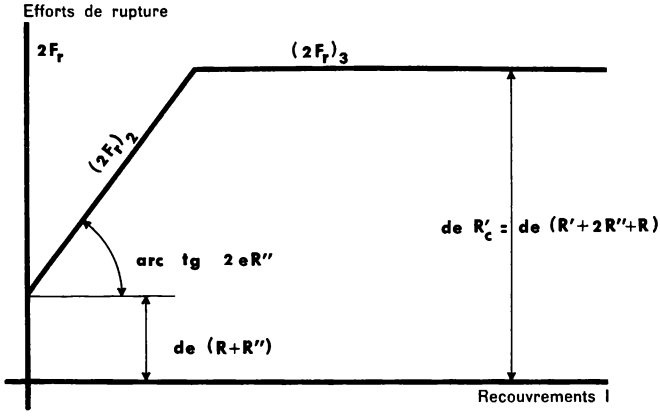


Fig. 149
Assemblages soudés par points ou par faux-rivets.

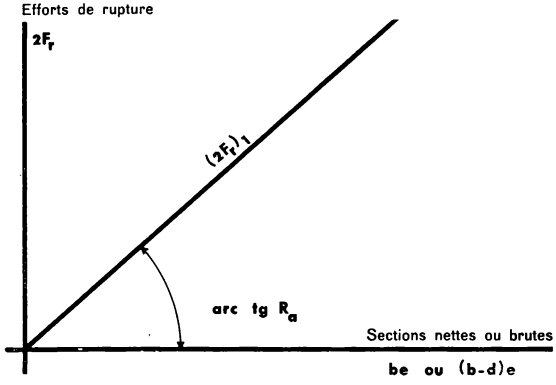


Fig. 150
Assemblages rivés ou boulonnés, soudés par points ou par faux-rivets.

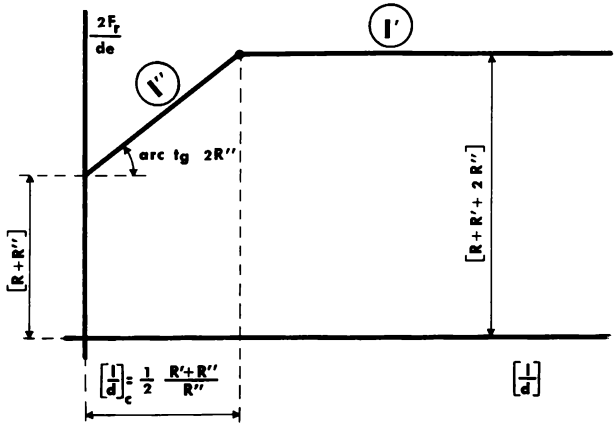


Fig. 151

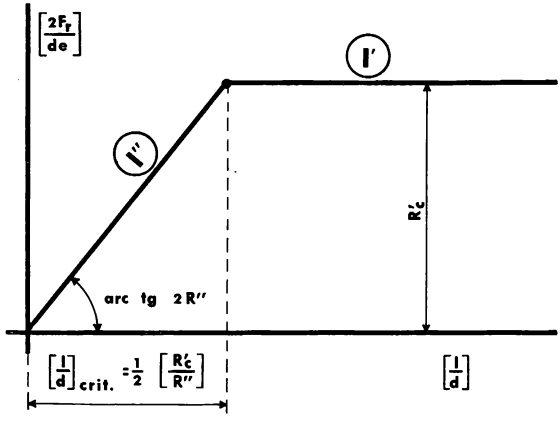


Fig. 152

Enfin, dernière remarque, si l'on divise par d e les valeurs de $(2\ F_r)_2$ et $(2\ F_r)_3$, on obtient les relations :

$$\frac{(2\ F_r)_2}{d\ e} = 2\left(\frac{l}{d}\right) R'' \text{ et } \frac{(2\ F_r)_3}{d\ e} = R' + R'' = R'_c$$

pour les assemblages rivés ou boulonnés, et :

$$\frac{(2\ F_r)_2}{d\ e} = \left[2\left(\frac{l}{d}\right) + 1\right] R'' + R$$

$$\frac{(2\ F_r)_3}{d\ e} = R' + 2\ R'' + R = R'_c$$

pour les assemblages soudés.

De même, en divisant par d e les ordonnées $(2\ F_r)$ des diagrammes correspondants et par d leurs abscisses l, on obtient des diagrammes relatifs (fig. 151 et 152), qui ne dépendent plus des dimensions des assemblages, qui dépendent uniquement du métal constituant et sont donc propres à celui-ci : ce sont des diagrammes intrinsèques.

5. Méthode expérimentale de détermination des résistances R et de leurs lois de variation éventuelles.

Pour déterminer les résistances R et leurs lois de variation, il suffit de soumettre aux essais de rupture des séries d'éprouvettes rivées ou boulonnées, soudées par points ou par faux-rivets, dont les tôles sont constituées par un métal identique et dont les dimensions sont telles que :

— les unes se rompent par traction dans les tôles pour diverses valeurs de section rompues;

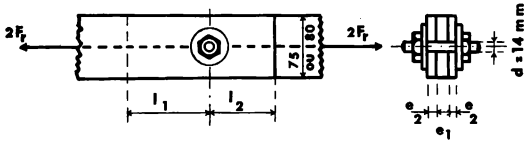
— les autres se rompent par cisaillement sur tranche ou compression sur tranche pour diverses valeurs de recouvrements;

— les dernières enfin se rompent par cisaillement de leurs rivets, boulons, points soudés ou faux-rivets.

Les résultats ainsi obtenus permettront de tracer expérimentalement les diagrammes de $(2\ F_r)_1$:

$$(2\ F_r)_2 \quad (2\ F_r)_3 \quad \frac{(2\ F_r)_2}{d\ e} \quad \frac{(2\ F_r)_3}{d\ e} \quad \text{et} \quad (2\ F_r)_4$$

d'où l'on déduira les résistances R et leurs lois de variation.



$2F_r$: charge de rupture

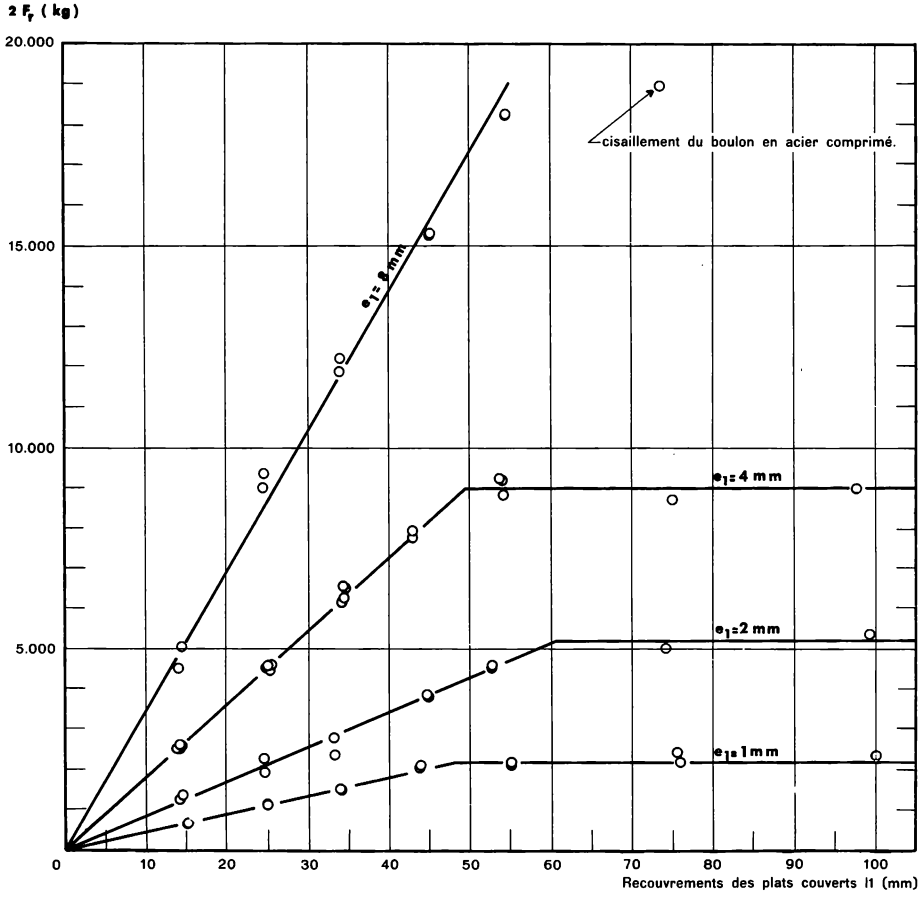


Fig. 153

6. Résultats expérimentaux : les résistances *R* sont indépendantes des dimensions des assemblages ; elles ne dépendent que du métal constituant : ce sont des constantes spécifiques caractéristiques de celui-ci. Ces constantes sont fondamentales pour le calcul des assemblages rivés ou boulonnés, soudés par point ou par faux-rivets.

Ayant procédé comme indiqué au paragraphe précédent, nous avons obtenu les résultats suivants concernant la résistance au cisaillement sur tranche et à la compression sur corps.

Tout d'abord, pour les assemblages boulonnés (fig. 153) :

— les diagrammes absolus de la rupture par cisaillement sur tranche sont rectilignes et partent de l'origine, ce qui prouve que $(2\ F_r)_2$ est proportionnel au recouvrement l;

— les diagrammes absolus de la rupture par compression sur corps sont rectilignes et parallèles aux abscisses ce qui prouve que $(2\ F_r)_3$ est indépendant du recouvrement l;

— il en est de même (fig. 154) des diagrammes relatifs :

$$\frac{(2\ F_r)_2}{d\ e} \quad \text{et} \quad \frac{(2\ F_r)_3}{d\ e} \quad \text{en fonction de} \quad \frac{l}{d}$$

ce qui prouve que la résistance au cisaillement sur tranche R'' et la résistance à la compression sur corps $R'_c = R' + R''$ sont deux constantes spécifiques, caractéristiques du métal constituant et indépendantes des dimensions des assemblages.

(Il est à remarquer que les diagrammes relatifs présentent une assez forte dispersion due aux différences de qualité entre tôles d'épaisseurs différentes).

De même, pour les assemblages soudés par points (fig. 155);

— les diagrammes absolus de la rupture par cisaillement sur tranche sont rectilignes et partent d'une valeur à l'origine, ce qui prouve que $(2\ F_r)_2$ croît linéairement en fonction du recouvrement l;

— les diagrammes absolus de la rupture par compression sur corps sont rectilignes et parallèles aux abscisses, ce qui prouve que $(2\ F_r)_3$ est indépendant du recouvrement;

— il en est de même (fig. 156) des diagrammes relatifs :

$$\frac{(2\ F_r)_2}{d\ e} \quad \text{et} \quad \frac{(2\ F_r)_3}{d\ e} \quad \text{en fonction de} \quad \frac{l}{d}$$

ce qui prouve que la résistance au cisaillement sur tranche R'' et la résistance à la compression sur corps $R'_c = R' + 2\ R'' + R$ sont deux constantes spécifiques, caractéristiques du métal constituant et indépendantes des dimensions des assemblages.

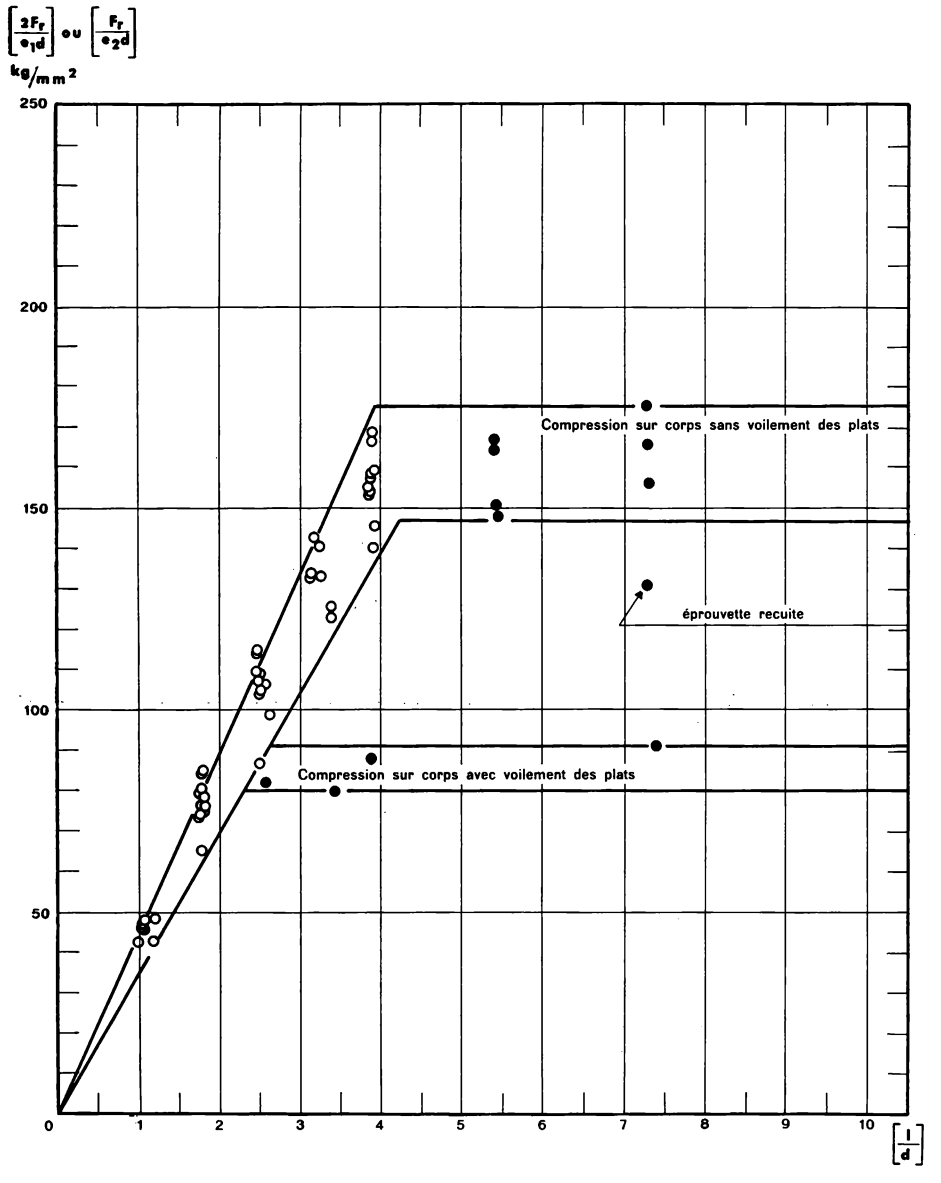
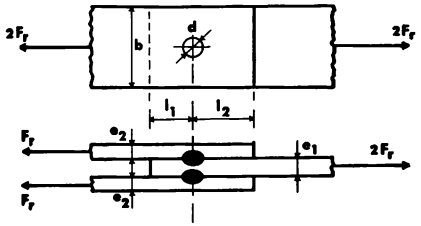

$\left[\frac{2F_r}{e_{1d}}\right]$ ou $\left[\frac{F_r}{e_{2d}}\right]$
kg/mm²
250
200
150
100
50
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
$\left[\frac{l}{d}\right]$
Compression sur corps sans voilement des plats
éprouvette recuite
Compression sur corps avec voilement des plats

Fig. 154


2F_r
b
d
2F_r
l_1
l_2
F_r
e_2
e_1
2F_r
F_r
e_2

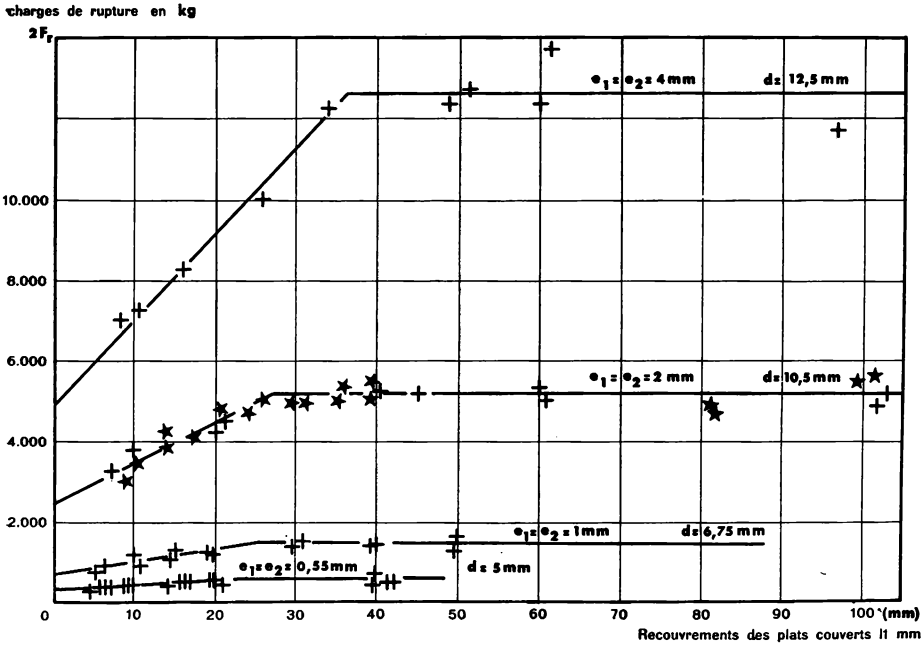

charges de rupture en kg
2F_r
10.000
8.000
6.000
4.000
2.000
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100 (mm)
Recouvrements des plats couverts l1 mm
e_1 = e_2 = 4 mm
d = 12,5 mm
e_1 = e_2 = 2 mm
d = 10,5 mm
e_1 = e_2 = 1 mm
d = 6,75 mm
e_1 = e_2 = 0,55 mm
d = 5 mm

Fig. 155

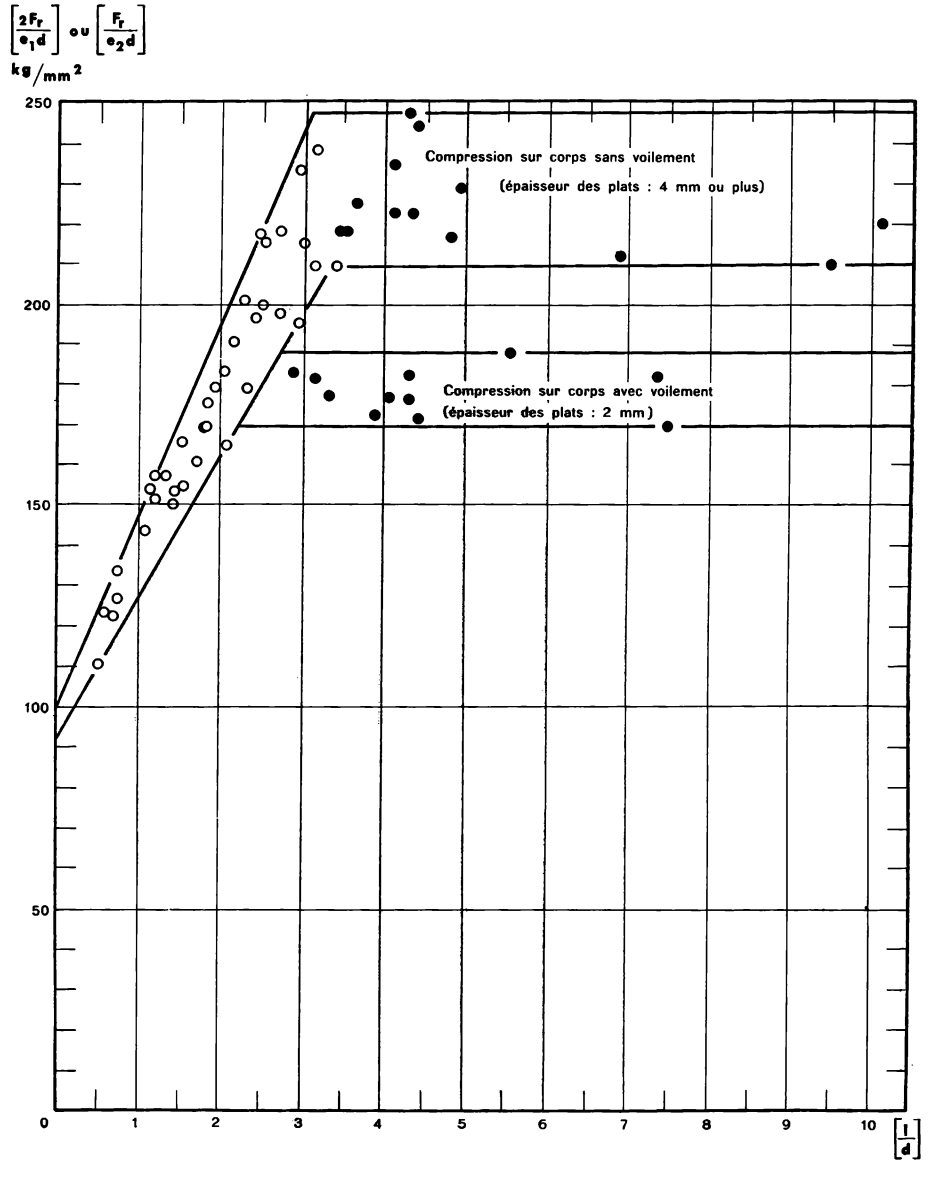
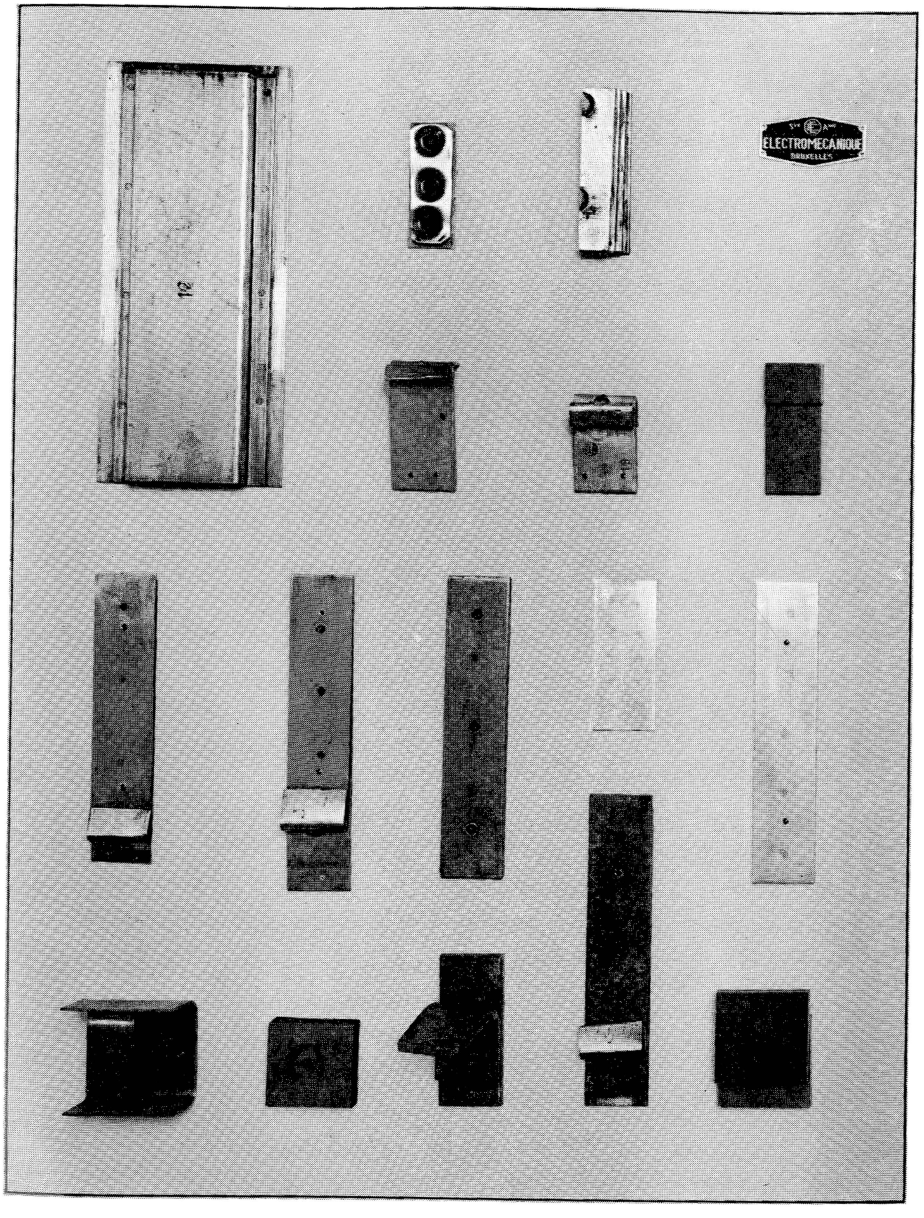

$\left[\frac{2F_r}{e_1 d}\right]$ ou $\left[\frac{F_r}{e_2 d}\right]$
kg/mm²
250
200
150
100
50
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
$\left[\frac{l}{d}\right]$
Compression sur corps sans voilement
(épaisseur des plats : 4 mm ou plus)
Compression sur corps avec voilement
(épaisseur des plats : 2 mm)

Fig. 156



Quelques exemples d'échantillons soudés par points.

CHAPITRE IV

TECHNIQUES ET PROCÉDÉS PARTICULIERS DU SOUDAGE PAR POINTS

TRANSFORMATEURS ET PINCES DE SOUDAGE

Lorsque l'on doit procéder au soudage par points de deux pièces, on peut amener ces deux pièces à la soudeuse ou au contraire déplacer la soudeuse vers les pièces à souder. On applique généralement la première solution. Toutefois, lorsque les pièces à souder sont trop volumineuses, ou que la précision de soudage exige la fixation des pièces à assembler dans des gabarits encombrants, on opte pour la seconde méthode.

Il est normal que l'on ait toujours avantage à réaliser un travail sur une soudeuse fixe, car on obtient une meilleure précision et la qualité des points est supérieure. Certains travaux néanmoins, ne peuvent être exécutés qu'en ayant recours à ces installations et l'on est alors bien forcé de se contenter des résultats obtenus.

Il va de soi que l'on a constamment apporté des améliorations à ces équipements, tant au point de vue mécanique qu'électrique ou électronique.

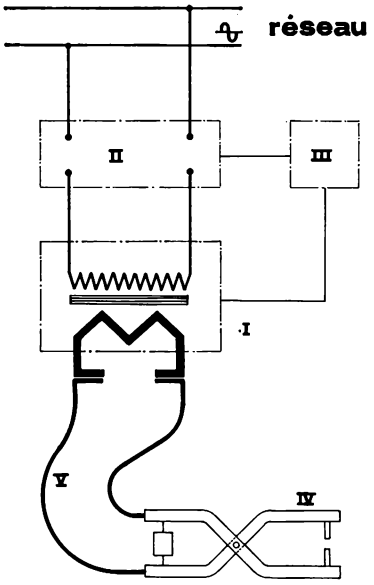


Fig. 157

SCHÉMA ÉLECTRIQUE D'UN ENSEMBLE TRANSFORMATEUR - PINCE

Un schéma de principe de l'ensemble est repris à la figure 157. Le schéma de principe du câblage et du raccordement est représenté à la figure 158.

On distingue les cinq parties importantes suivantes :

— le transformateur (I);
— le contacteur (II);
— l'appareil électronique (III);
— la pince de soudage (IV);
— les câbles secondaires (V).

Le raccordement au réseau pour le circuit de puissance se fait par l'intermédiaire de fusibles protégeant le circuit, et d'un sectionneur permettant le branchement de l'installation.

Le circuit de puissance passe ensuite par le contacteur du transformateur (II_1), commandé par un électro-aimant (II_2). Le contacteur représenté sur le schéma est un contacteur électromagnétique.

On peut envisager le placement d'un contacteur ionique, lorsqu'il s'agit de couper de très fortes intensités, d'obtenir des temps de soudage rigoureusement constants ou d'atteindre des cadences de soudage élevées.

Le circuit de puissance alimente le circuit primaire du transformateur de soudage (I_1). Le commutateur (I_2), placé dans le circuit, a pour but le réglage de la puissance.

La variation possible du nombre de spires dans le circuit primaire permet d'obtenir diverses tensions aux bornes du secondaire (I_3), ce qui détermine différentes intensités secondaires.

Fixés sur le transformateur, on distingue :

— la plaque à bornes (I_4) des circuits auxiliaires;
— un contacteur à pression (I_5);
— une électrovanne commandant le passage de l'air comprimé nécessaire au fonctionnement de l'ensemble (I_6).

La pince (IV) est raccordée au secondaire (I_3) du transformateur par les câbles secondaires (V).

Sur la pince de soudage se trouve fixé le bouton de commande (IV_1).

Les circuits auxiliaires sont alimentés par un réseau auxiliaire et protégés par un sectionneur et des fusibles. L'alimentation se fait en 1 et 2 de la plaque à bornes I_4.

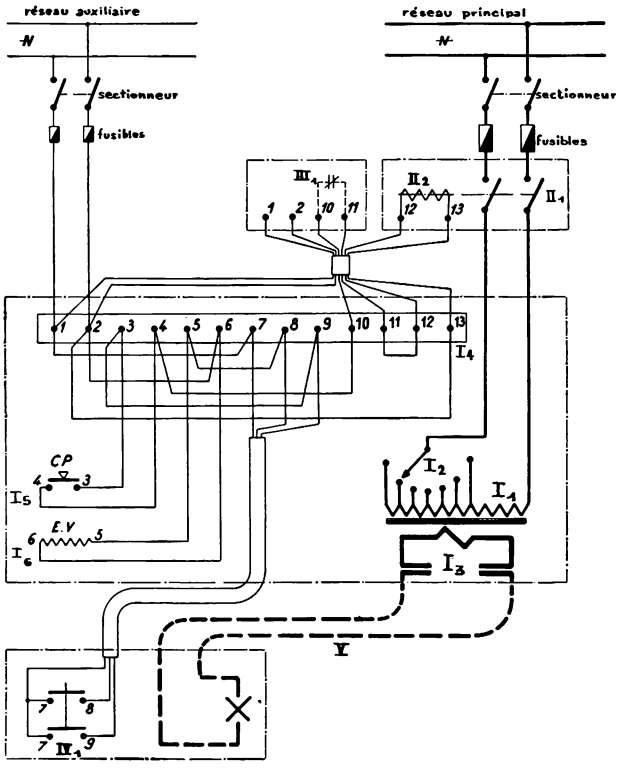


Fig. 158

Schéma de principe du câblage et raccordement d'un ensemble transformateur suspendu et pince de soudage.

Fonctionnement.

La commande des opérations de soudage se fait depuis la pince par le bouton de commande à deux contacts IV_1.

Lorsque le premier contact est enclenché 7 et 8 sont court-circuités. Le circuit 1-7-8-5-6-2 est fermé et un courant parcourt la bobine de l'électrovanne (I_6).

Sous l'action du courant, l'armature est attirée et l'électrovanne livre passage à l'air comprimé qui alimente le cylindre pneumatique actionnant la pince. Les électrodes de la pince sont mises sous pression.

Lorsque le second contact du bouton de commande IV_1 est fermé, le courant parcourt le circuit 1-7-9-3-4-10-11-12-13-2 et excite la bobine du contacteur (II_2), pour autant que l'interrupteur à pression I_5 soit fermé. Cet interrupteur se ferme quand la pression s'est établie dans le cylindre pneumatique.

Il évite ainsi que le courant de soudage ne soit enclenché avant que la pression requise ne soit établie aux électrodes de la pince.

Le contact III_1, situé entre 10 et 11 à l'intérieur de l'appareil électronique de contrôle du temps de soudage (traits-pointillés), est normalement fermé.

Le fait que la bobine II_2 ait été excitée, provoque la fermeture du contacteur principal II_1. Le courant de soudage parcourt le circuit secondaire jusqu'au moment où le contact III_1 s'ouvre, car à ce moment, la bobine II_2 sera désexcitée.

Le contact III_1 s'ouvre lorsque le temps de soudage prédéterminé par le réglage établi sur l'appareil électronique a été atteint.

Si l'on relâche les deux contacts du bouton de commande, l'ensemble se retrouve à son point de départ et une nouvelle manœuvre peut être envisagée. Notons enfin que la connexion 1 et 2 du transformateur vers l'appareil électronique sert uniquement à l'alimentation de celui-ci.

DESCRIPTION DES ORGANES DE L'ENSEMBLE TRANSFORMATEUR - PINCE

L'équipement transformateur et pince de soudage n'est en somme qu'une soudeuse par points dont on a séparé deux éléments importants, à savoir : le transformateur et la partie mécanique. Ces deux parties ont ensuite été reliées entre elles par des câbles conducteurs souples.

La figure 159 montre un ensemble typique.

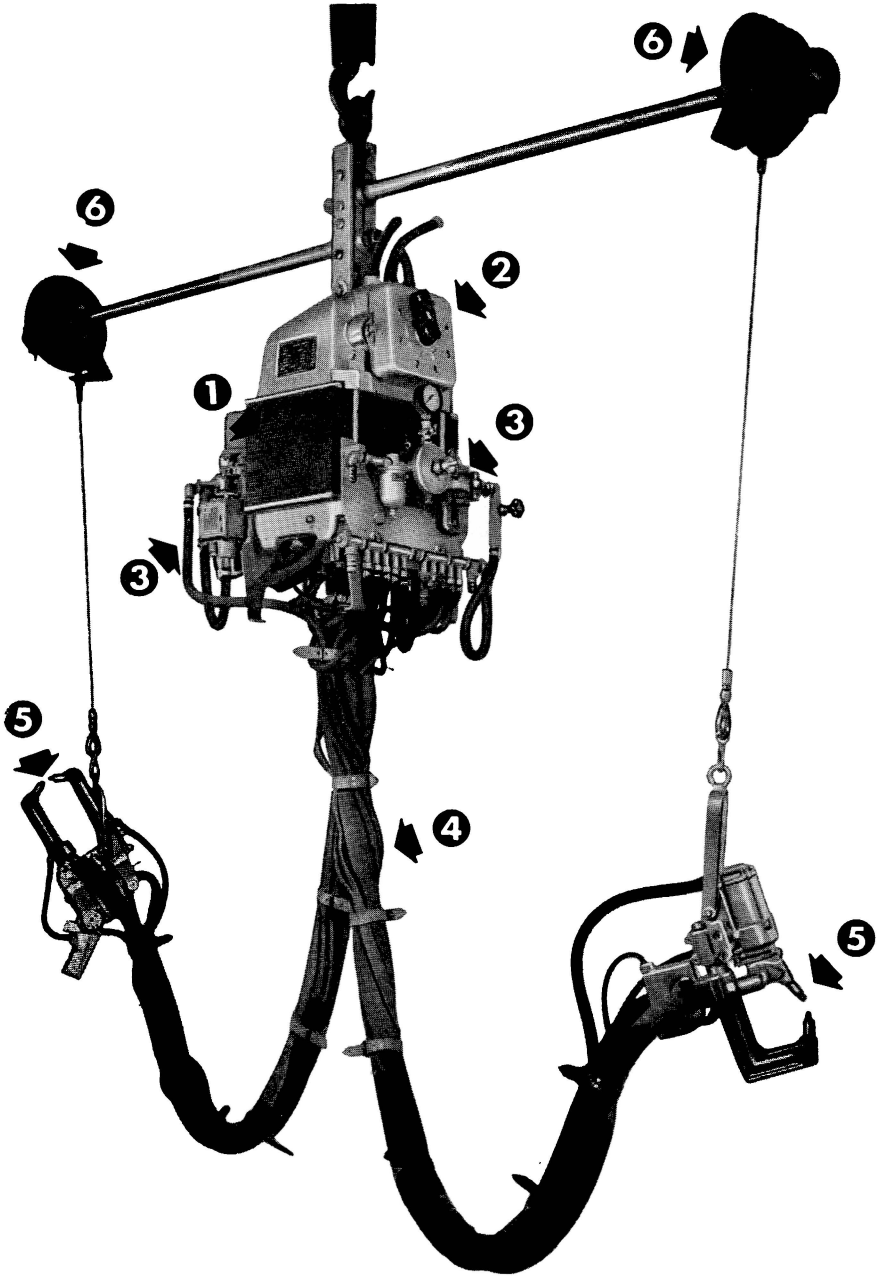


Fig. 159

On distingue :

1. Le transformateur et son commutateur.
2. Le contacteur et l'appareil électronique temporisateur.
3. Les accessoires.
4. Les câbles secondaires amenant l'énergie du transformateur aux pinces de soudage.
5. Les pinces de soudage.
6. Les équilibreurs.

Nous étudierons successivement les divers éléments de cet équipement.

LE TRANSFORMATEUR.

On distingue dans un transformateur les trois parties principales suivantes :

— le circuit magnétique,
— le bobinage primaire,
— le bobinage secondaire.

Le transformateur est du type cuirassé, c'est-à-dire que le fer enveloppe et protège les bobinages.

La figure 160 montre l'arrangement des bobines primaires et des secondaires autour du noyau.

Le bobinage primaire est constitué par plusieurs bobines ou galettes comportant un certain nombre de spires et mises, soit en parallèle, soit en série, selon le cas.

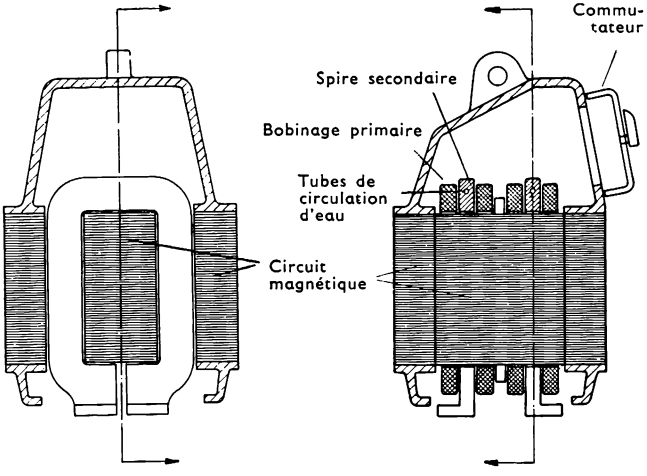


Fig. 160
Coupe schématique d'un transformateur suspendu.

Les bobines primaires (fig. 161) alternent avec les spires secondaires (fig. 162). Un isolant de très faible épaisseur les sépare.

Après empilage des bobines primaires et secondaires, et éventuellement de spires intercalaires destinées uniquement au refroidissement, le tout est fortement serré de sorte que, par conduction, les secondaires et éventuellement les spires de refroidissement, parcourus par l'eau, refroidissent les bobinages primaires.

Ce bobinage en « sandwich » assure un rendement électrique élevé.

Les transformateurs suspendus ont en général une tension secondaire maximum relativement élevée par rapport à une machine à souder par point, pour compenser les pertes dans les câbles de raccordement de la pince.

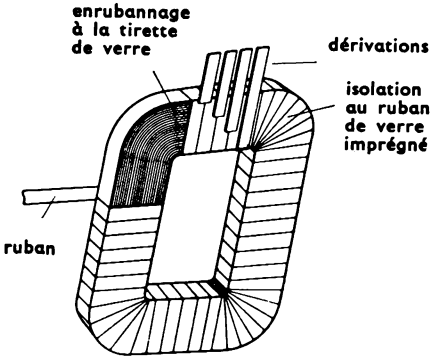


Fig. 161
Bobine primaire.

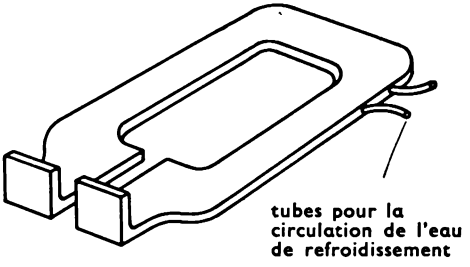


Fig. 162
Spire secondaire.

LE COMMUTATEUR.

Le commutateur (voir I_2 sur la figure 158 et 2 sur la figure 159) est rotatif.

Il est fixé sur le chapeau du transformateur de soudage et fait corps avec l'ensemble.

LE CONTACTEUR.

La coupure du courant de soudage doit être assurée par un contacteur. Ce contacteur peut être du type mécanique à commande électromagnétique avec soufflage ou du type électronique.

EXEMPLE DE CARACTÉRISTIQUES DE TRANSFORMATEURS

	TS 30	TS 80	TS 200
$P_{100\ o/o}$	21 kVA	56 kVA	141 kVA
$P_{50\ o/o}$	30 kVA	80 kVA	200 kVA
P_{max} approximatif (appareil électronique compris) (1)	110 kVA	225 kVA	500 kVA
Tension min. sec. à vide	6,4 V	9,3 V	7,3 V
Tension max. sec. à vide	11 V	16,2 V	20 V
Courant secondaire max. approximatif (1)	10 000 A	14 000 A	23 000 A
Puissance de raccordement nécessaire monophasée	50 kVA mono	130 kVA mono	300 kVA mono
Câbles secondaires	175 mm²	175 ou 225 mm²	225 ou 400 mm²
Longueur des câbles secondaires	2,5 m	2,5 m	2,5 m
Rapport P_{max}/P_{min}	3	3	7,5

(1) Il est dit P_{max} *approximatif* et courant secondaire maximum *approximatif* car ces valeurs dépendent du type de pince raccordée au transformateur, de la longueur des câbles de raccordement et de leur section.

LES ACCESSOIRES.

L'électrovanne.

L'électrovanne est un des accessoires que l'on rencontre toujours dans un ensemble transformateur - pince de soudage. Cette vanne, commandée électriquement, assure l'arrivée d'air au piston de la pince, dans le cas d'une pince pneumatique, ou au surpresseur dans le cas d'une pince hydraulique.

Un ensemble filtre-manodétendeur-lubrificateur.

Un ensemble filtre-manodétendeur-lubrificateur se trouve fixé sur une des faces du transformateur. L'air comprimé passe par cet ensemble avant d'être admis au cylindre par l'intermédiaire de l'électrovanne (voir fig. 163).

Un tel ensemble a été décrit au chapitre II soudage par points.

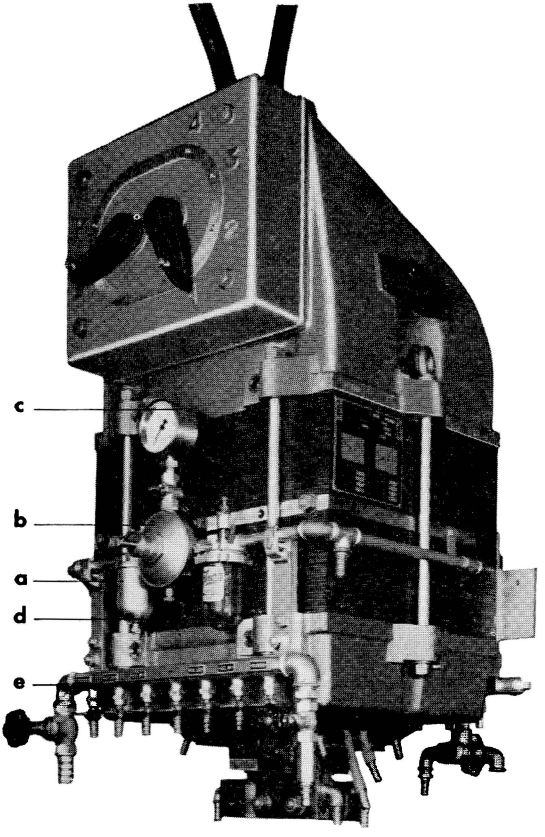


Fig. 163
a. Filtre,
b. Manodétendeurs,
c. Manomètre,
d. Lubrificateur,
e. Circuit de refroidissement.

Le contacteur à pression.

Le contacteur à pression (fig. 164) contrôle la pression d'air comprimé dans le cylindre et empêche le démarrage de la soudure avant que la pression pour laquelle il est réglé ne soit bien établie. On assure de la sorte un effort de forgeage toujours constant aux électrodes.

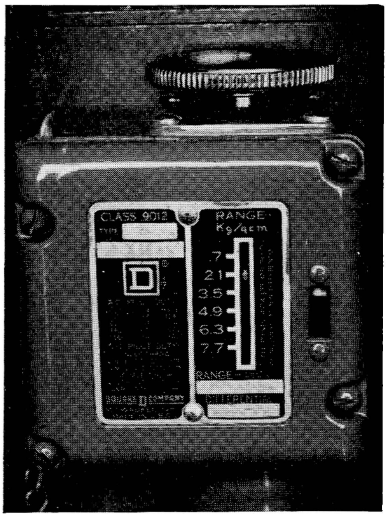


Fig. 164
Contacteur à pression

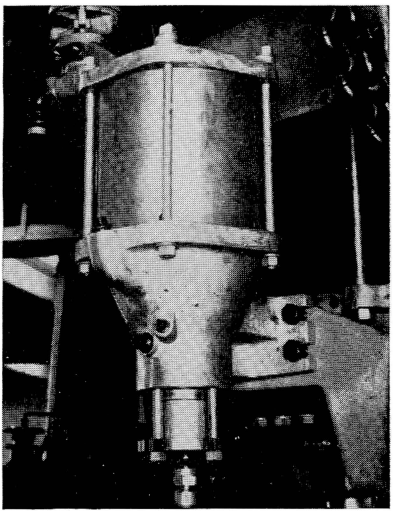


Fig. 165
Surpresseur.

La rampe de distribution de l'eau.

Une rampe de distribution de l'eau (fig. 163 e) de refroidissement fixée sur la partie avant du transformateur, permet de régler indépendamment le débit de chaque circuit de refroidissement. Il y a en général un circuit de refroidissement pour :

— un des câbles secondaires, le bras supérieur et l'électrode supérieure de la pince;
— le second câble, le bras inférieur et l'électrode inférieure de la pince;
— le transformateur;
— éventuellement les ignitrons de l'appareil électronique.

Le surpresseur.

Dans le cas de pinces hydrauliques, on fait usage, ainsi que déjà signalé, d'un surpresseur. La pince hydraulique se justifie, lorsque les efforts de

soudage transmis aux électrodes deviennent trop importants. En effet, dans pareil cas, le cylindre pneumatique actionnant la pince deviendrait tellement volumineux que celle-ci serait peu maniable. On préfère alors actionner la pince au moyen d'un cylindre hydraulique, les pressions hydrauliques spécifiques pouvant être dix fois et plus, supérieures aux pressions pneumatiques.

Le surpresseur est fixé au dos du transformateur. Il fonctionne à l'air comprimé et son principe de fonctionnement a été décrit précédemment.

L'équilibreur.

Pour compenser le poids de la pince, qui peut varier de quelques kilos jusqu'à une centaine de kilos, on fait emploi d'équilibreurs. Les équilibreurs peuvent être simples ou doubles, selon que le transformateur est raccordé à une ou deux pinces de soudage (voir fig. 159, repère 6).

LES CABLES SECONDAIRES.

Les câbles secondaires de raccordement de la pince de soudage au transformateur peuvent être de types différents :

a) deux câbles séparés (voir fig. 166);

b) deux câbles torsadés placés dans une même gaine (voir fig. 167).

Les câbles sont refroidis par circulation d'eau.

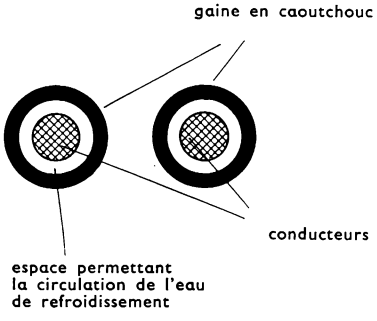


Fig. 166

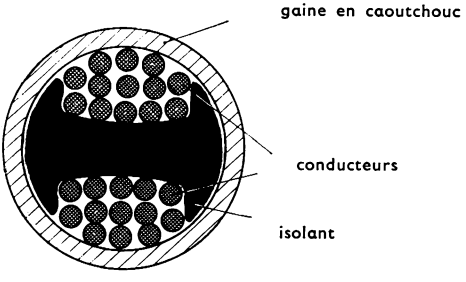


Fig. 167

LA PINCE DE SOUDAGE.

Une pince de soudage (voir fig. 168) comporte :

a) Les électrodes qui, fixées aux extrémités des bras, assurent la transmission de l'effort de soudage sur les pièces à souder. Elles sont en cuivre allié et sont refroidies par circulation d'eau.

b) Les bras supérieur et inférieur. Ces bras sont également refroidis. Ils ont une section déterminée par l'effort de soudage appliqué aux électrodes.

c) Un cylindre. Ce cylindre peut être pneumatique ou hydraulique.

d) Un bouton de commande fixé sur une poignée de manœuvre. On déclenche le cycle de soudage par action sur le bouton. Ce bouton-poussoir, qui peut parfois prendre la forme d'une gâchette, comporte généralement deux contacts : le premier commande l'action mécanique; le second commande le passage du courant de soudage.

e) Un dispositif permettant la suspension de la pince à l'équilibreur.

Une des caractéristiques les plus importantes des pinces de soudage est l'effort qu'elles permettent d'exercer sur la soudure.

Un effort de soudage élevé assure une soudure de bonne qualité et évite les projections de matière en fusion durant le soudage. Une partie de l'effort que développe la pince est généralement employée pour joindre les tôles à souder, celles-ci n'étant pas toujours jointives. Le reste sert effectivement à forger la matière fondue lors du passage du courant, et à assurer l'union des pièces à assembler.

On emploie généralement deux types de pinces de soudage :

1) les pinces pneumatiques,

2) les pinces hydrauliques.

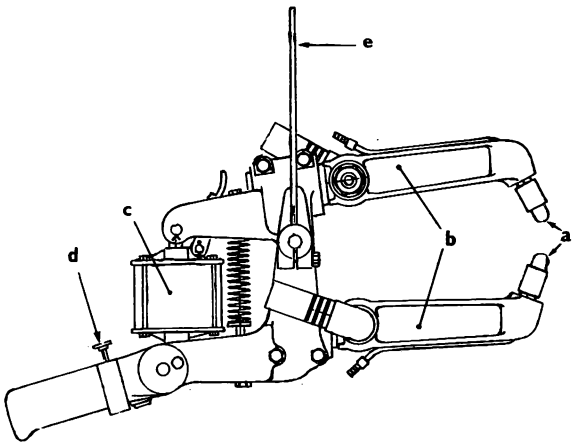


Fig. 168

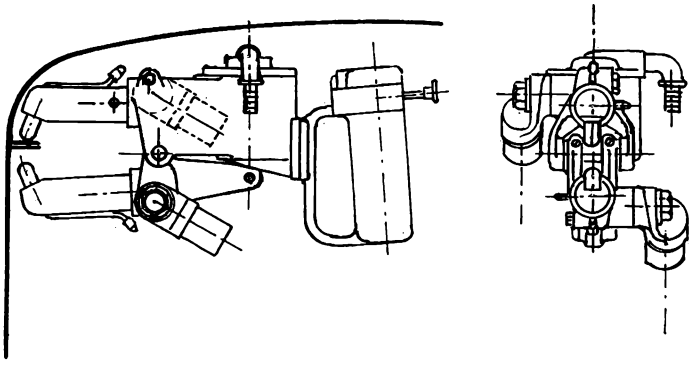


Fig. 169

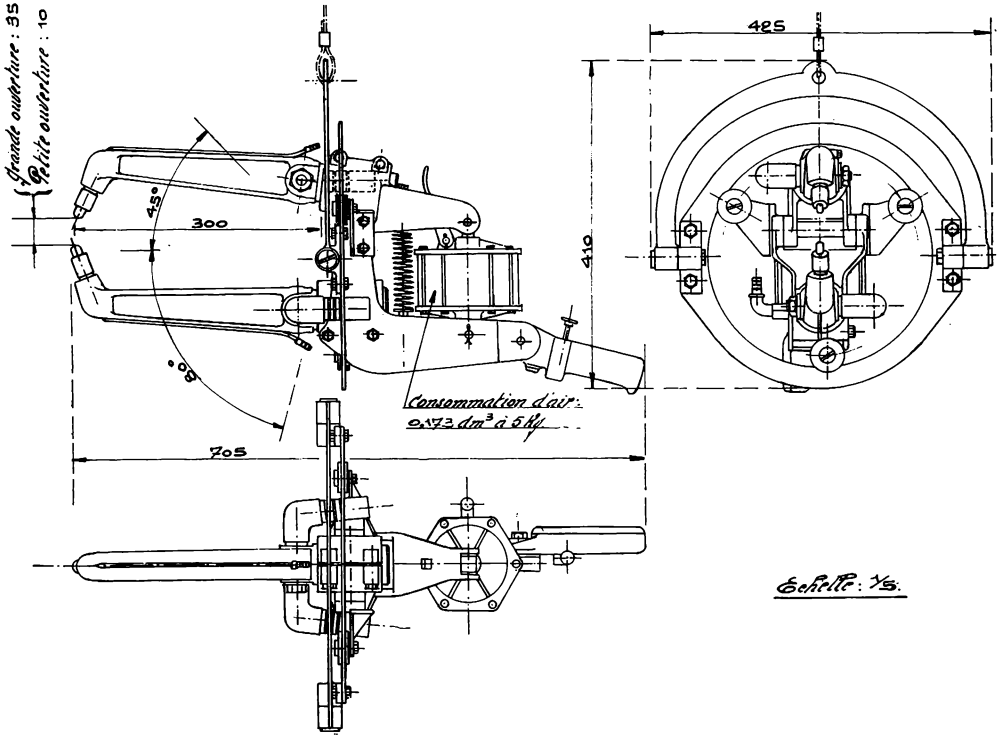


Fig. 170

Les pinces pneumatiques.

Ces pinces sont étudiées en fonction des opérations de soudage que l'on désire réaliser. Les figures 169 à 172 montrent quelques schémas et photos de pinces standards.

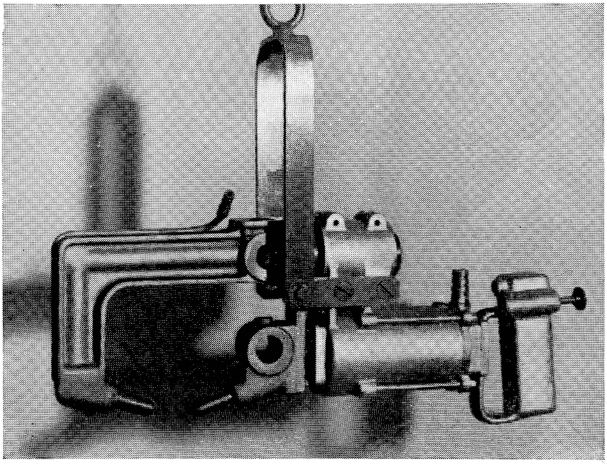


Fig. 171

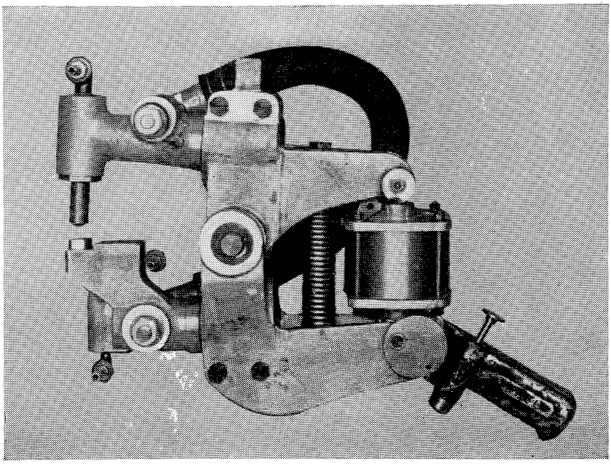


Fig. 172

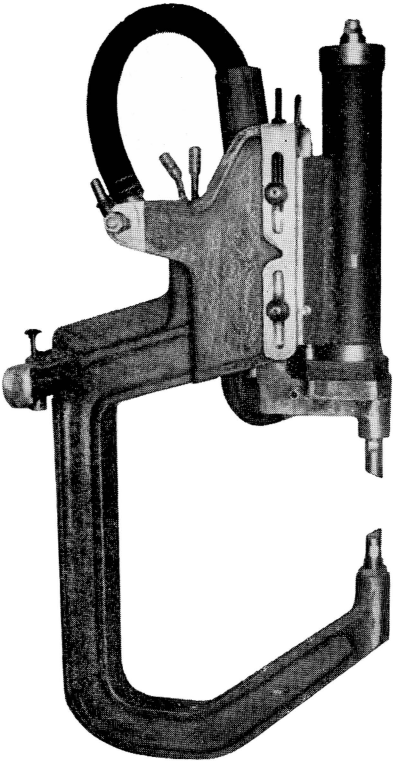


Fig. 173

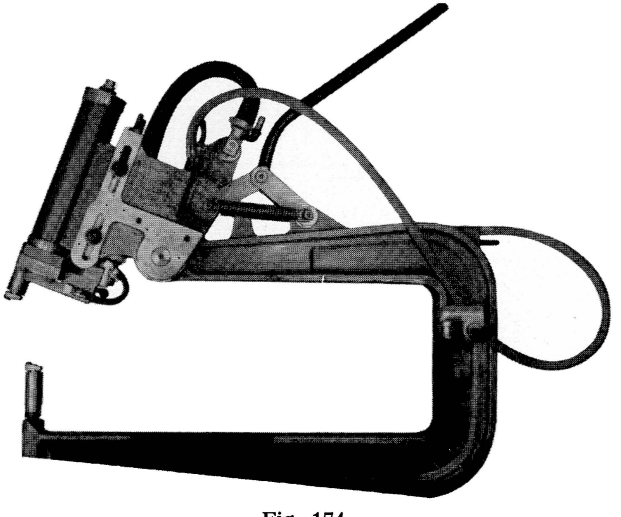


Fig. 174

Les pinces hydrauliques.

Ainsi qu'il a déjà été dit, on utilise des pinces hydrauliques lorsque les efforts à obtenir aux électrodes sont importants.

Le fait que l'on emploie des pressions spécifiques élevées (50 kg/cm^2 par exemple), permet de réduire l'encombrement du cylindre et rend donc la pince plus maniable.

Le retour de la tête mobile de la pince peut se faire soit par l'action d'un ressort de rappel, soit par air comprimé envoyé sur la face inférieure du piston hydraulique de la pince.

Les pinces sont parfois pourvues de dispositifs permettant d'obtenir une grande ouverture afin de faciliter l'introduction de la pince dans les pièces à souder.

La capacité de soudage des pinces hydrauliques n'est pas toujours déterminée par l'effort qu'elles peuvent engendrer.

En effet, comme ces pinces sont employées pour le soudage de fortes épaisseurs, les assemblages sont parfois tellement rigides, qu'il faut souvent un effort bien plus important pour amener les pièces à souder en contact franc, que pour le soudage proprement dit.

Quelques pinces hydrauliques sont représentées aux figures 173 à 175.

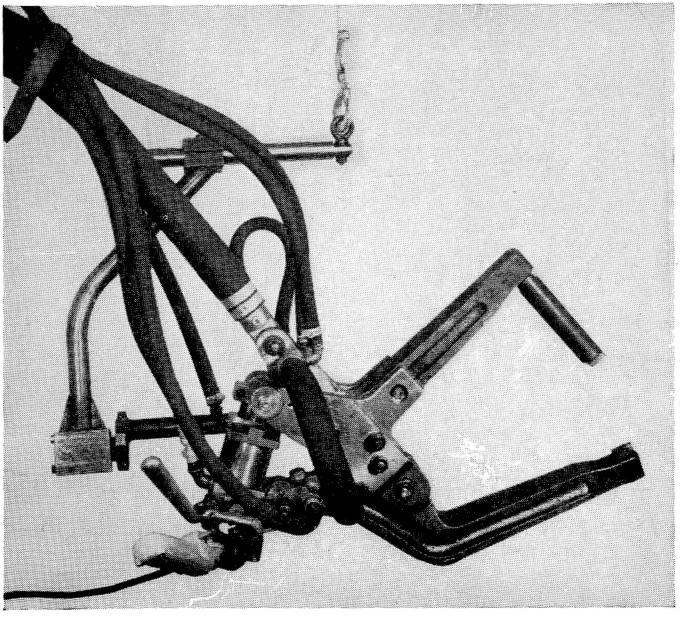


Fig. 175

Utilisation.

Les pinces de soudage sont utilisées dans les fabrications suivantes :

Carrosserie automobile,
Carrosserie d'autobus,
Construction de voitures de chemin de fer,
Meubles métalliques,
Meubles de cuisine,
Frigos, cuisinières,
Menuiserie métallique,
Ventilation et conditionnement d'air,
Machines à laver,
Machines agricoles.

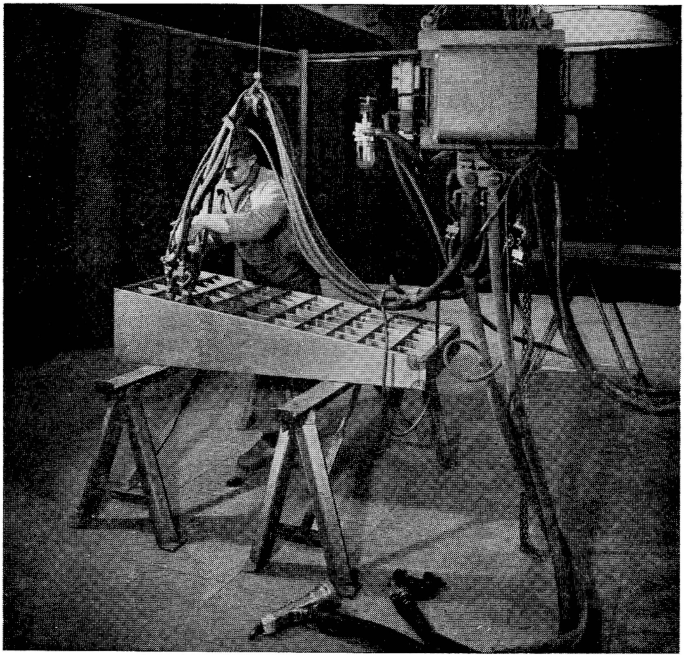


Fig. 176

Fabrication d'éléments de meubles métalliques au moyen de transformateur suspendu et pince pneumatique.

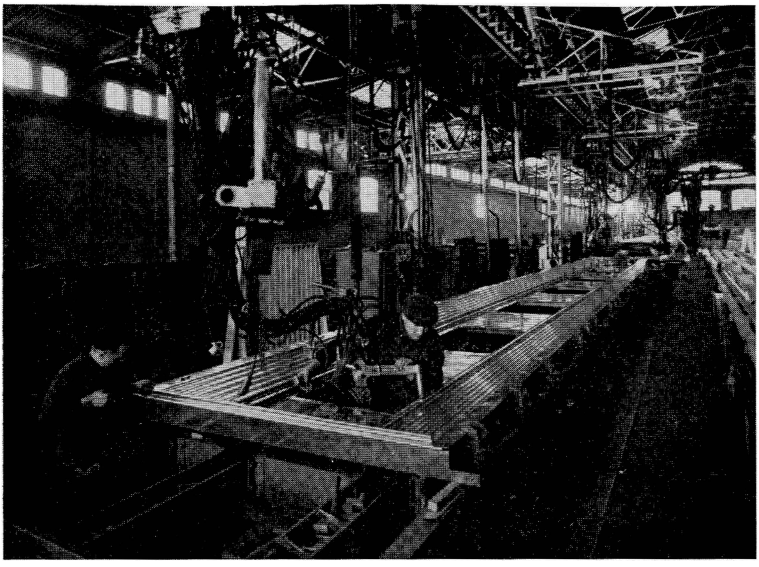


Fig. 177

Soudage d'un long pan de voiture de chemin de fer.

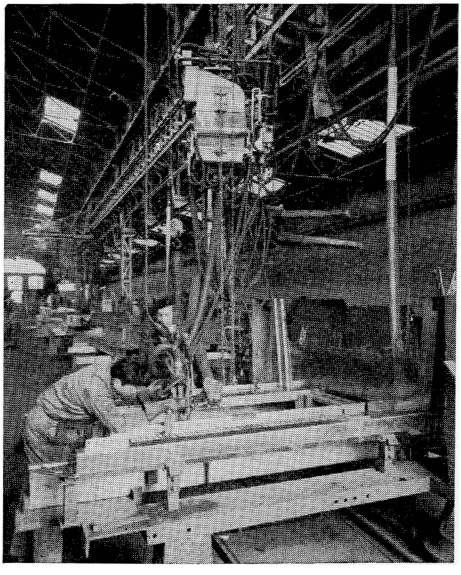


Fig. 178

Emploi d'une pince hydraulique alimentée par transformateur suspendu, pour la fabrication d'éléments de voitures de chemin de fer.

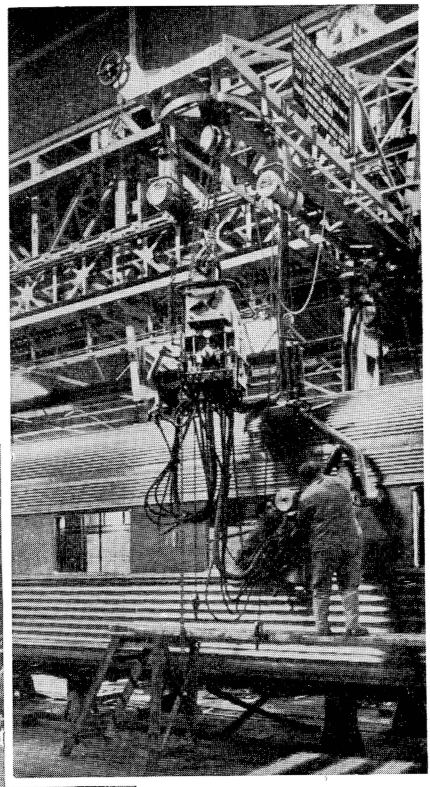


Fig. 179

Soudage de voitures de chemin de fer au moyen de pinces hydrauliques et transformateur suspendu.

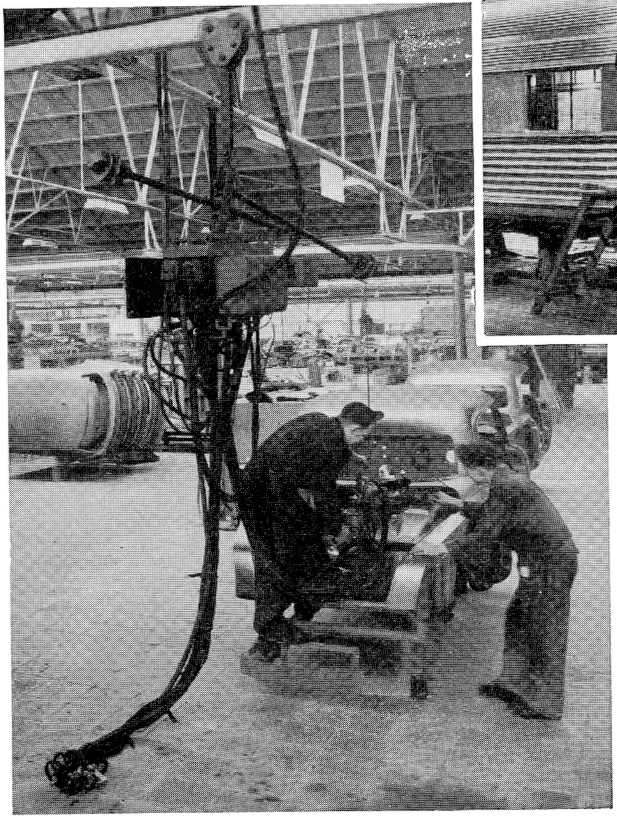


Fig. 180

Soudage par pinces pneumatiques de carrosseries de voitures.

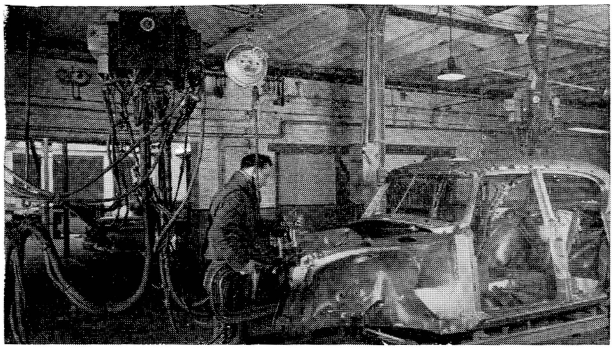


Fig. 181
Soudage de carrosseries de voitures.

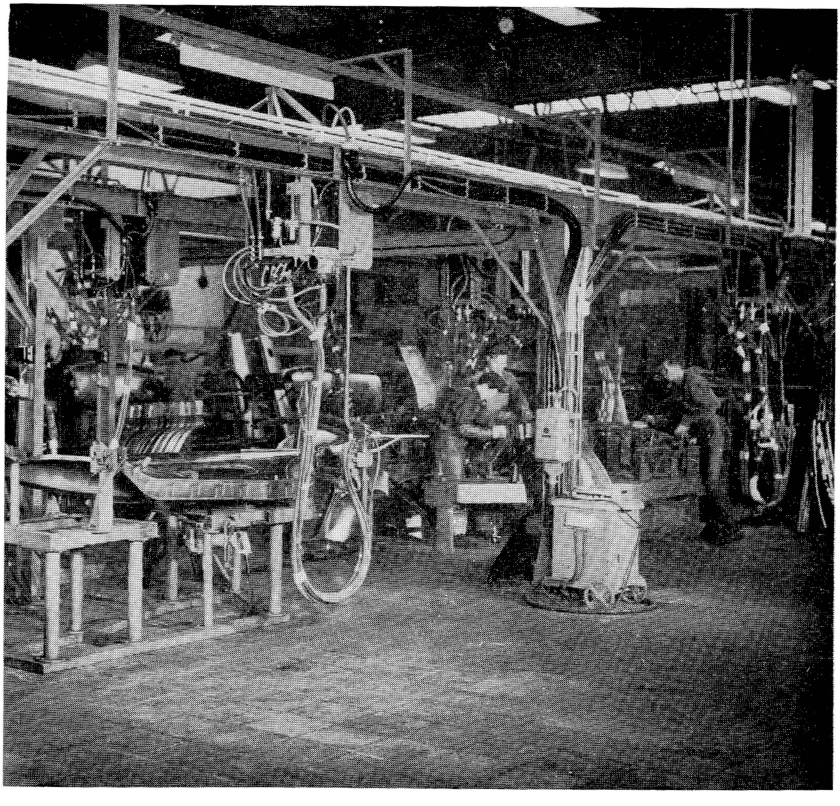


Fig. 182
Assemblage d'une carrosserie.

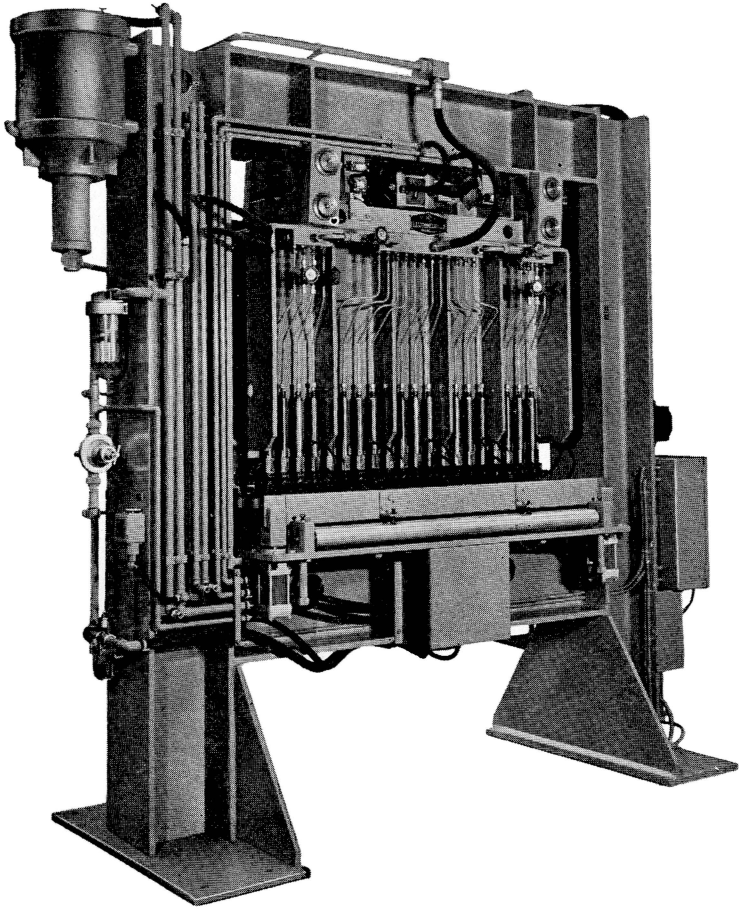


Fig. 183
Machines à souder multipoint pour le raboutage de tôles.

LE SOUDAGE MULTIPOINT

PRINCIPE

Le soudage au point par résistance électrique est appliqué avec succès, là où se présentent de très grandes séries de pièces à assembler.

Réduire le temps de fabrication au minimum devient alors l'objectif primordial du constructeur et il trouve intérêt à mettre en œuvre, sur la même machine, un certain nombre d'électrodes exécutant, en une séquence d'opérations entièrement automatiques, tous les points de soudure prévus pour la réalisation de l'assemblage. C'est le résultat obtenu par les machines du *Type Multipoint.*

Dans le cas le plus général, il s'agit de fixer sur une tôle de base, divers emboutis, tels que renforts, pattes d'attache, poignées, etc. La tôle de base peut, elle-même, avoir été préalablement préparée par découpage et emboutissage; elle peut également avoir reçu certaines garnitures dans les opérations de montage antérieures. Un tel problème d'assemblage en grandes séries étant posé, une étude approfondie est entreprise, qui a pour but d'établir le calcul et les plans d'une machine du *Type Multipoint.* Celle-ci, une fois réalisée, ne pourra servir à assembler d'autres pièces que moyennant des modifications importantes.

On en trouve de remarquables applications en carrosserie automobile (voitures, camions); en construction de motocyclettes, bicyclettes et voitures d'enfants, en matériel de chemin de fer, machines agricoles, radiateurs, meubles métalliques, récipients divers et d'une façon générale, partout où la tôle mince est la matière de base utilisée et où le nombre de points à souder et la production justifient l'emploi de pareilles machines.

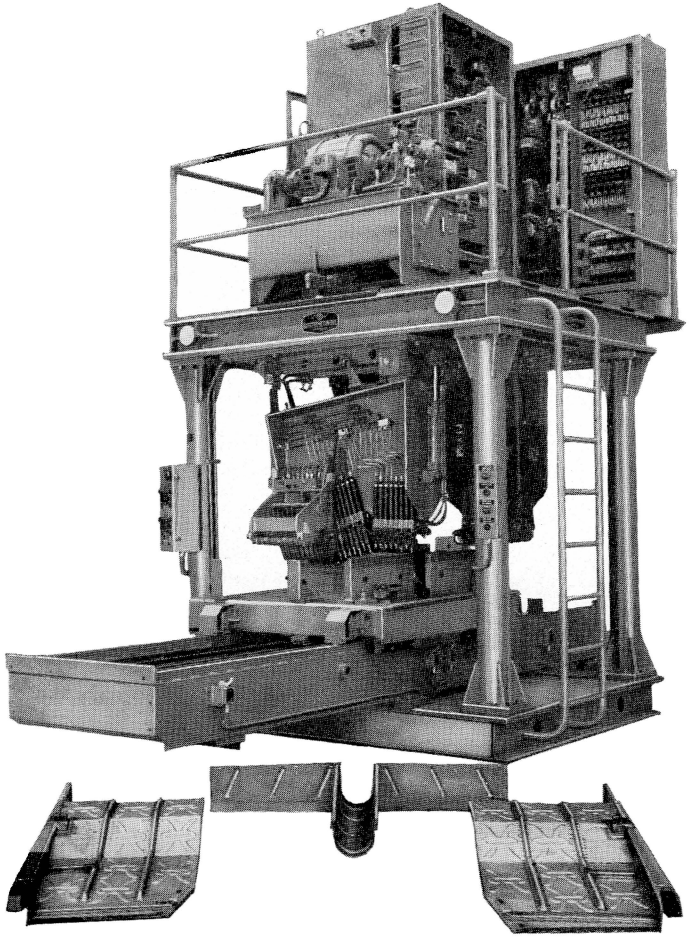


Fig. 184

Machine à souder multipoint permettant l'assemblage de deux demi-planchers de voiture automobile sur le tunnel d'arbre.

DESCRIPTION

MONTAGE SUR GABARIT.

Les différentes pièces à souder doivent être mises dans leurs positions respectives et tenues provisoirement en place pour éviter tout déjettement en cours d'opérations. Elles sont positionnées et clamées sur un gabarit, qui porte aussi les contre-électrodes (voir fig. 185).

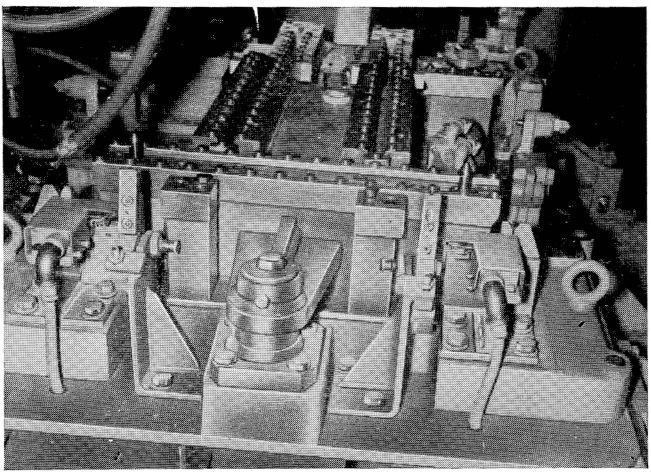


Fig. 185

Gabarit de soudage pour machine multipoint, avec dispositifs de clamage et contre-électrodes.

GROUPES DE POINTS.

Le réseau des points à souder est souvent complexe. Cependant, il est possible de définir des *Groupes*. Chaque groupe comporte un certain nombre de points choisis suivant des règles imposées, tant par la technique du soudage au point que par des symétries d'ordre électrique ou mécanique.

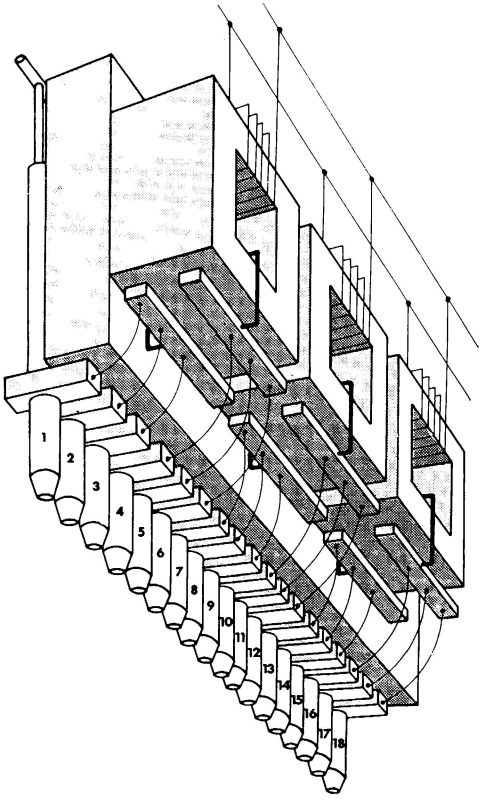


Fig. 186
Groupe de soudage.

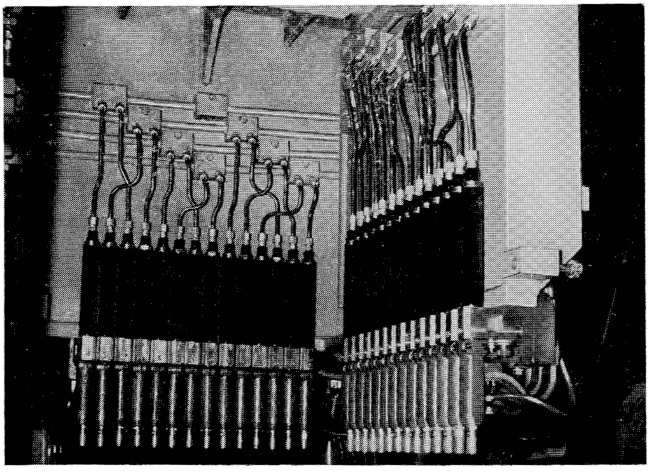


Fig. 187
Eléments de pression hydrauliques d'une soudeuse multipoint.

GROUPES DE SOUDAGE.

(voir fig. 186).

A chacun des groupes de points correspond un *groupe de soudage*. C'est un matériel bien défini et comportant invariablement :

a) Un caisson en tôle d'acier soudé.

b) Un (ou plusieurs) transformateurs boulonnés sur le caisson. La spire secondaire de chaque transformateur est prolongée par deux connexions rigides, une à chacune de ses extrémités.

c) Un certain nombre d'*éléments de pression à fonctionnement hydraulique ou pneumatique* par transformateur (voir fig. 187).

Un *élément de pression* comporte un cylindre et son piston auquel est fixé un porte-électrode avec électrode. Chaque cylindre est muni d'une patte d'attache servant à fixer les éléments côte à côte sur le caisson.

d) Des *shunts* flexibles en feuillards de cuivre rouge ou des câbles de connexion. Chaque porte-électrode est raccordé à un transformateur par un shunt ou un câble.

CIRCUIT SECONDAIRE - CYCLE DE SOUDAGE.

Le circuit électrique doit être étudié dans chaque cas particulier. Plusieurs cas peuvent être envisagés :

— le circuit direct;
— le circuit indirect;
— le circuit série (cas d'un nombre pair de points);
— le circuit série (cas d'un nombre impair de points);
— le circuit push-pull.

Dans la mesure du possible, on évite toujours, quel que soit le type de circuit choisi, qu'un transformateur alimente simultanément plus d'un circuit de soudage, afin d'éviter une répartition inégale des courants dans des circuits présentant forcément des impédances différentes.

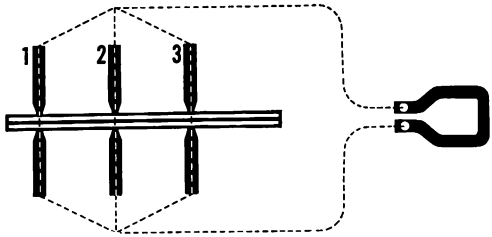


Fig. 188

Circuit direct :

Premier cycle : 1. Deuxième cycle : 2. Troisième cycle : 3.

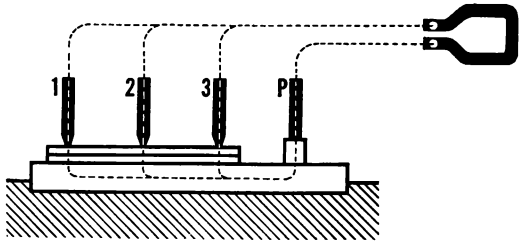


Fig. 189

Circuit indirect : fermeture du circuit par plot sur contre-électrode.

Premier cycle : 1. Troisième cycle : 3.
Deuxième cycle : 2. Retour par le plot P.

Le circuit direct
(fig. 188).

Un transformateur de soudage alimente successivement les circuits qui y sont raccordés.

La séquence des opérations pour le soudage d'un point est la suivante :

a) Abaissement d'une électrode;
b) Passage du courant;
c) Maintien de la pression après la coupure du courant;
d) Relèvement de l'électrode.

Le cycle se renouvelle pour chaque circuit.

Le circuit indirect
(fig. 189).

Il se différencie du circuit direct par le mode de retour du courant qui, gagne un plot de retour par une contre-électrode.

Dans certains cas, le retour se fait par la tôle inférieure, et un plot appliqué sur celle-ci; la contre-électrode n'a alors plus pour rôle que de positionner les pièces.

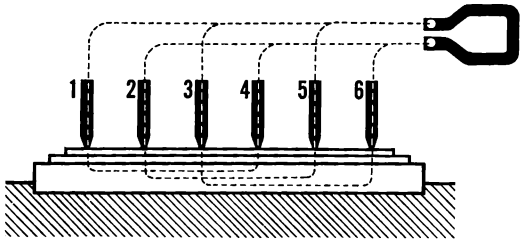


Fig. 190

Circuit série : cas d'un nombre pair de points.

Premier cycle : 1 et 4. Deuxième cycle : 2 et 5. Troisième cycle : 3 et 6.

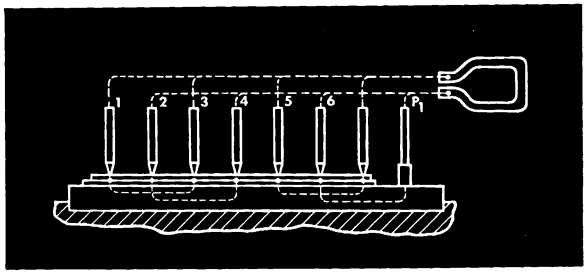


Fig. 191

Circuit série : cas d'un nombre impair de points.

Premier cycle : 1 et 3.
Deuxième cycle : 2 et 4.
Troisième cycle : 5 et 7.
Quatrième cycle : 6 et P_1.

Le circuit série : cas d'un nombre pair de points

(fig. 190).

Le courant parvient du transformateur à une électrode, traverse les pièces en soudant un premier point, parcourt une portion de la contre-électrode établie sur le gabarit et servant de support aux pièces, traverse à nouveau les pièces en soudant un second point et retourne au transformateur par une autre électrode.

La séquence des opérations pour souder deux points est la suivante :

a) L'abaissement des électrodes et l'établissement de la pression de soudage (accostage).

b) Le passage du courant (soudage);

c) Le maintien de la pression après le passage du courant (forgeage);

d) Le relèvement des électrodes.

S'il n'y a que deux éléments de pression, il n'y a qu'un seul cycle de soudage. Le plus souvent, il y a plusieurs éléments de pression connectés à un même transformateur. Ces éléments sont alors groupés par paires de manière à constituer autant de cycles de soudage.

Le circuit Série est le plus recherché car, le circuit « aller » reste proche du circuit « retour » et l'impédance est faible. Cependant, on est limité par le courant dérivé par la tôle supérieure.

Le circuit série : cas d'un nombre impair de points

(fig. 191).

On s'efforce de prévoir un nombre d'éléments de pression pair groupés sur un même transformateur de manière à réaliser des paires de points comme par exemple sur la vue schématique de la figure 191. Dans le cas où il faut nécessairement prévoir un nombre de points impair, l'un des cycles correspond à un seul point soudé et à un passage direct entre la contre-électrode et un plot de retour.

Remarque sur le circuit série.

Il est possible de souder simultanément 2 points correspondant à 2 électrodes voisines. Toutefois, lorsque la distance entre 2 électrodes voisines devient faible (inférieure à 60 mm dans le cas de tôle de 0,8 mm), le courant dérivé par la tôle supérieure devient considérable. On est alors amené à associer des électrodes distantes de 2 et même de 3 pas. Pour la tôle de 0,8 mm, la distance la plus avantageuse entre 2 électrodes associées est de l'ordre de 75 à 100 mm.

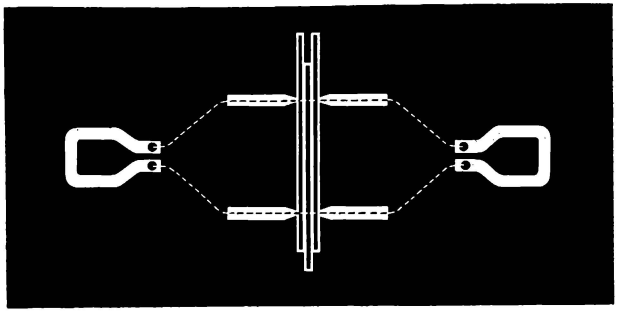


Fig. 192
Le circuit push-pull.

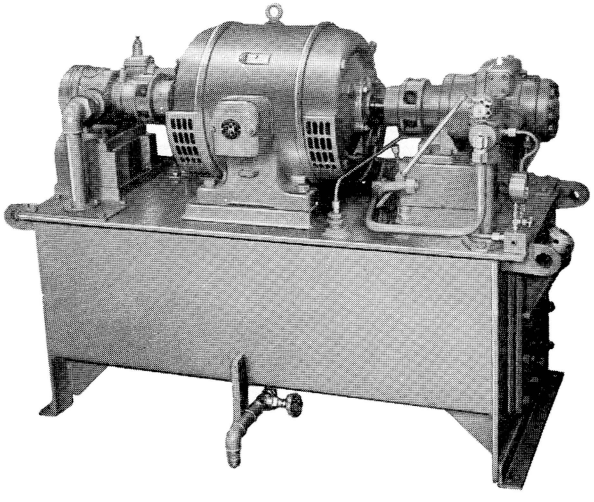


Fig. 193
Groupe moto-pompes d'une machine à souder multipoint hydraulique.

Le circuit push-pull

(fig. 192).

Le circuit push-pull permet de travailler avec des circuits d'impédance réduite ainsi qu'avec des transformateurs unitaires de plus faible encombrement.

Ils peuvent également servir à alimenter un ou plusieurs circuits successivement.

DÉPLACEMENT DU GABARIT.

Lorsqu'un groupe a opéré une première fois sur les pièces, c'est-à-dire, lorsque tous les cycles ont été exécutés en succession, les pièces ont reçu un nombre déterminé de points que l'on peut désirer reproduire ailleurs une ou plusieurs fois.

On doit, dans ce cas, déplacer le gabarit de manière à lui faire occuper une ou plusieurs nouvelles positions de soudage. Chaque cas doit être étudié en particulier. Souvent, on désire une reproduction suivant une ou plusieurs directions parallèles. Dans ce cas, on montera le gabarit sur un chariot ou encore, on le déplacera le long d'un guidage vertical ou oblique.

CHASSIS.

Le châssis adopté pour les soudeuses multipoint est le plus souvent constitué d'un socle, de deux ou de quatre colonnes et d'un sommier.

Le socle est équipé pour recevoir le gabarit fixe ou mobile. Le sommier est garni à la fois sur ses deux faces :

— sur la face inférieure sont agencés les groupes de soudage;

— sur la face supérieure est aménagée une plate-forme, avec garde-fou, accessible par une échelle attenante au châssis. Sur cette plate-forme, on dispose le plus souvent les armoires des commandes hydrauliques, électrique et électronique ainsi que le groupe moto-pompes.

LES ORGANES DE COMMANDE.

Sur la plate-forme :

— Le groupe moto-pompes comprenant le moteur avec une ou deux pompes (haute et basse pressions), les soupapes de décharge et le réservoir à huile — accouplements et raccordements (voir fig. 193);

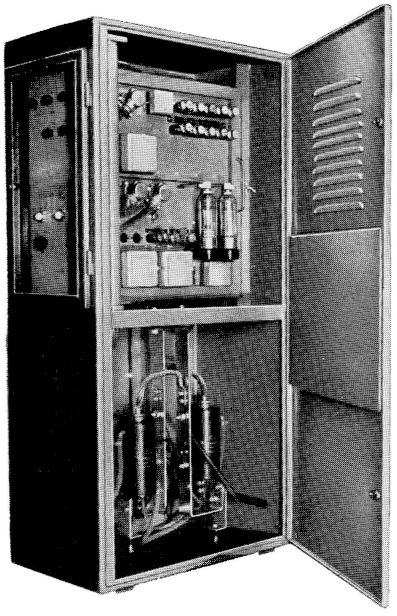


Fig. 194

Armoire électronique pour la commande du cycle de soudage d'une soudeuse multipoint.

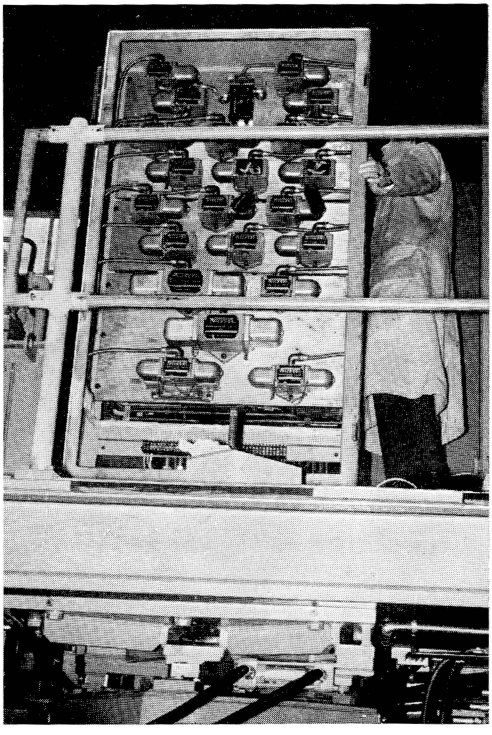


Fig. 195

Armoire hydraulique de commande d'une soudeuse. multipoint.

— L'armoire électronique pour la commande du cycle de soudage (voir fig. 194);

— L'armoire hydraulique contenant les électro-valves, contacteurs à pression, robinets, manomètres, soupapes hydrauliques et les tuyauteries de raccordement (voir fig. 195);

— L'armoire électrique contenant les disjoncteurs, contacteurs, relais, dispositifs de sécurité (voir fig. 196).

Sur le châssis :

Distribués sur le châssis, les organes de commande comportent encore :

— Les boîtes à boutons;

— Les butées escamotables et leurs fins de course dont le rôle est de localiser le chariot sur ses différentes positions de soudage;

— Les dispositifs hydrauliques commandant les organes mobiles (chariot groupes — butées — etc.);

— Le circuit de refroidissement;

— Les raccordements électrique et hydraulique.

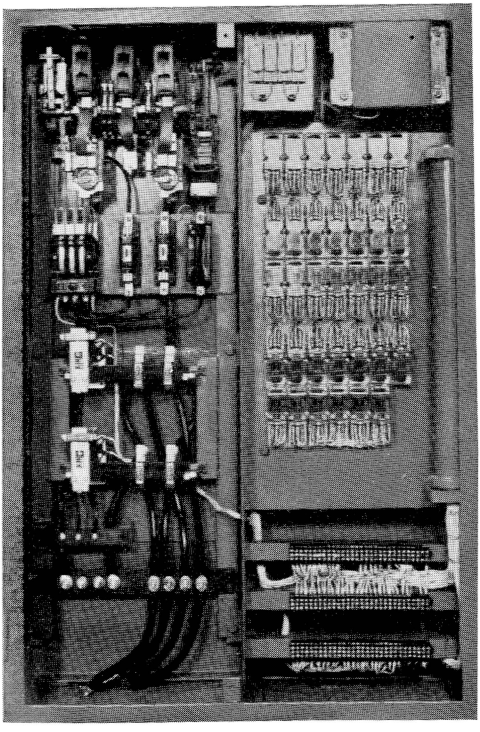


Fig. 196

Armoire à relais et disjoncteurs d'une soudeuse multipoint.

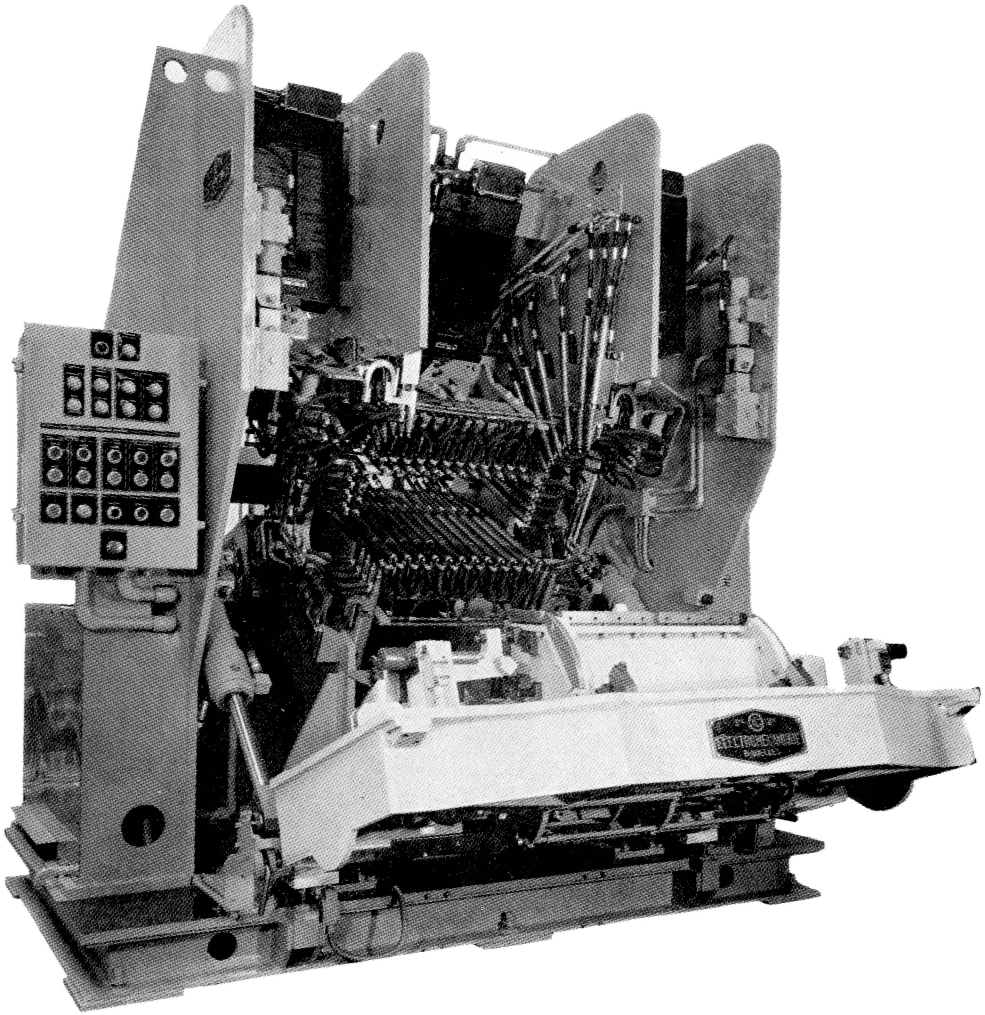


Fig. 197

Machine à souder multipoint pour assemblage des pièces de coffre de voiture, comportant 60 têtes de soudage alimentées par 7 transformateurs.

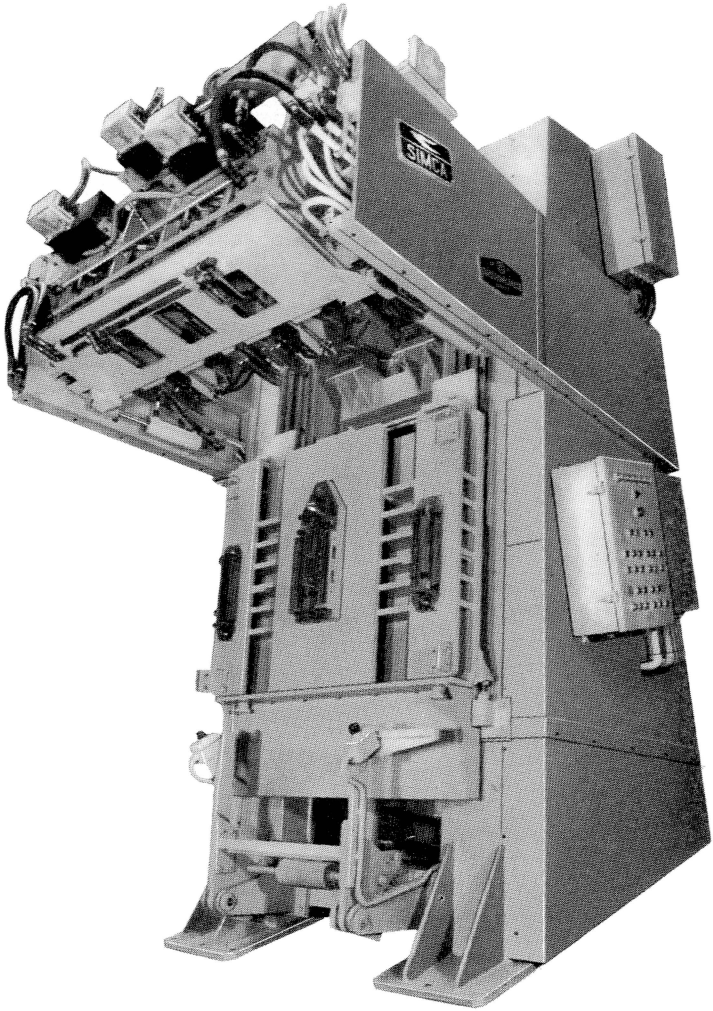
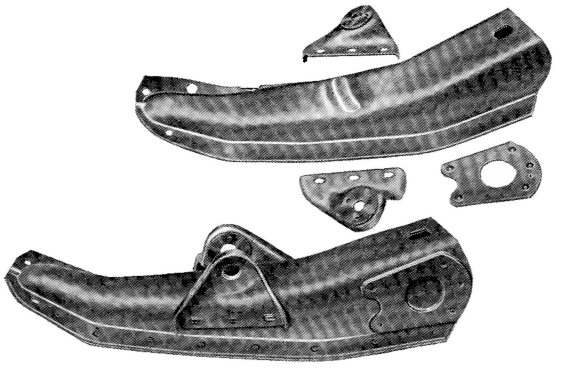


Fig. 198

Machine à souder multipoint pour l'assemblage de glissières de sièges et de renforts de planchers de voitures, comportant 10 têtes de soudage triples alimentées par 3 transformateurs réalisant 30 points soudés.



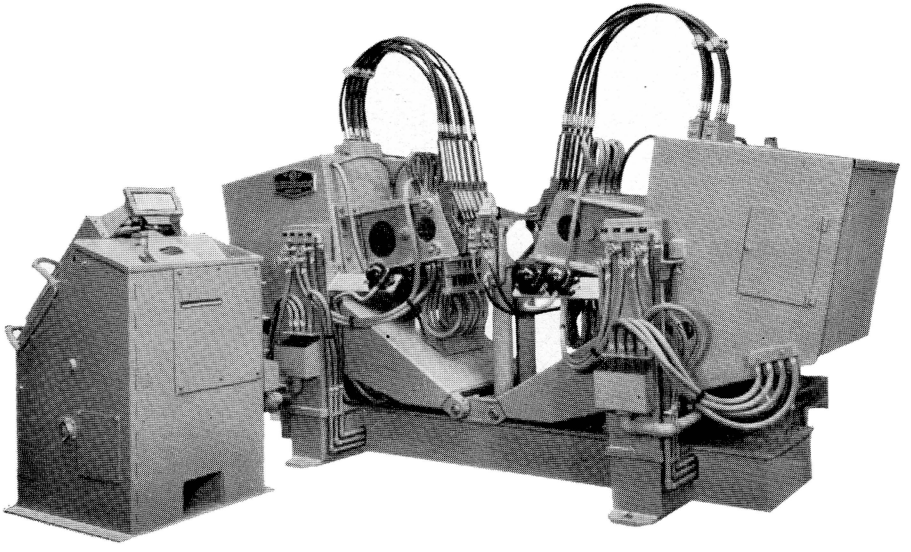


Fig. 199

Machine à souder multipoints pour l'assemblage de la tôle de fermeture sur le bras inférieur de suspension avant de voiture.

Cette machine comporte 13 pinces de soudage et 2 transformateurs; elle s'adapte automatiquement au soudage des pièces gauche ou droite.

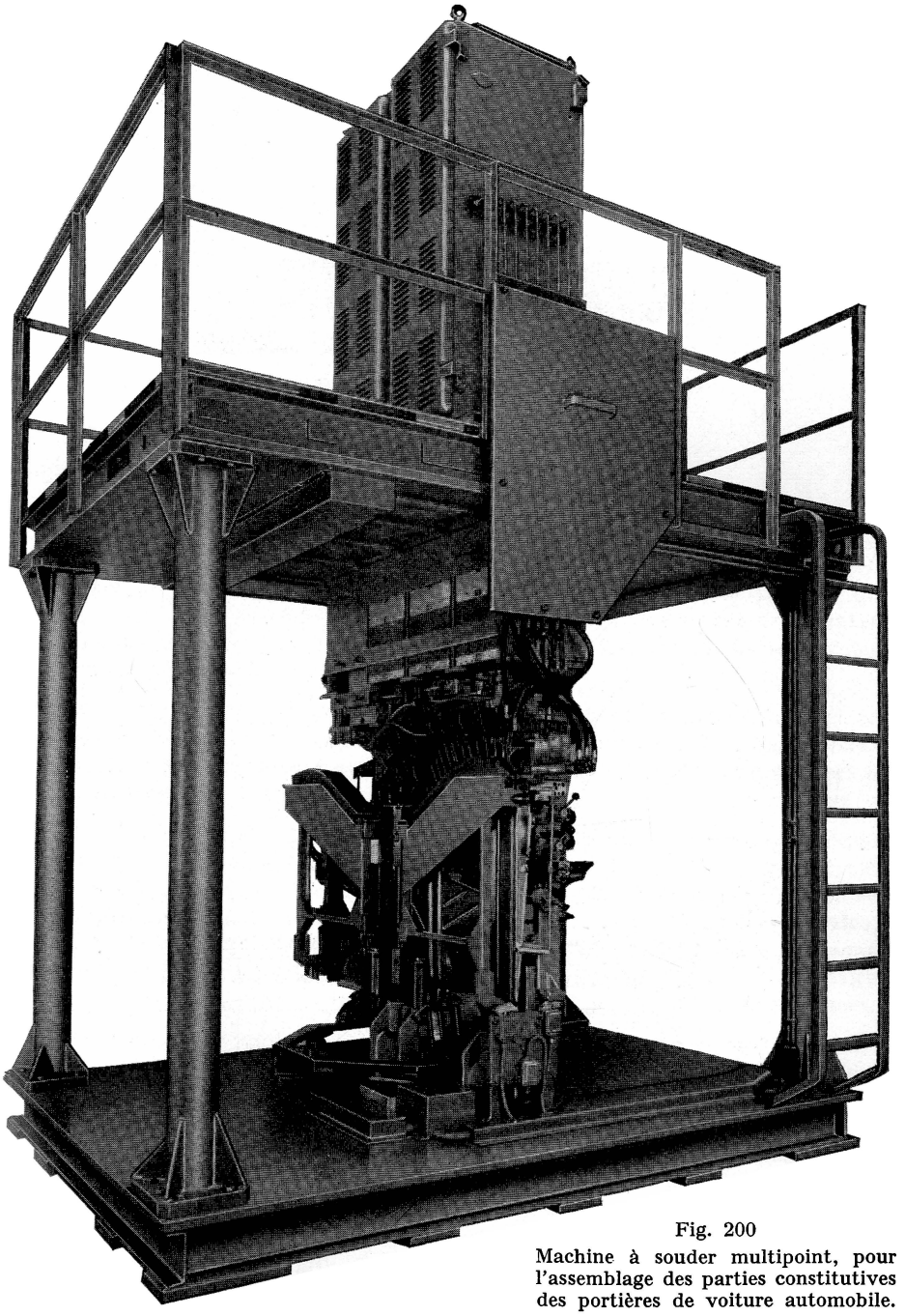


Fig. 200
Machine à souder multipoint, pour l'assemblage des parties constitutives des portières de voiture automobile.

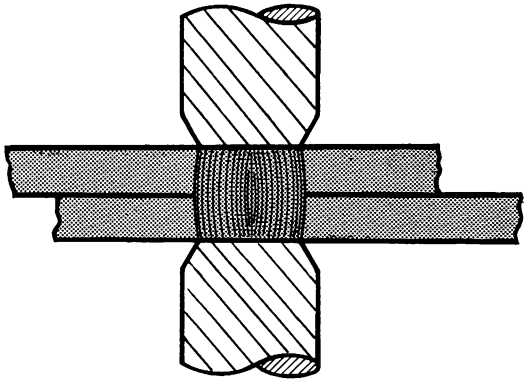


Fig. 201
Soudage par point. — Pièces planes entre électrodes de soudage.

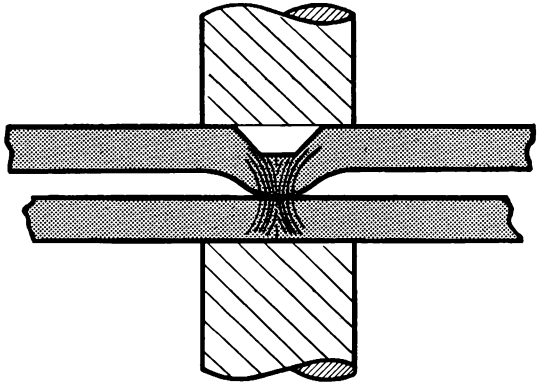


Fig. 202
Soudage par bossage. — L'une des pièces est prévue avec bossage.
Les électrodes sont massives.

LE SOUDAGE PAR BOSSAGES

GÉNÉRALITÉS ET PRINCIPES

Le procédé de soudage par bossages est une méthode d'assemblage dérivée du procédé classique de soudage électrique par points.

Dans le procédé simple de soudage par points, la surface de passage du courant secondaire est déterminée par la forme et les dimensions des pointes d'électrodes soumises à un effort de compression qui doit vaincre la raideur des tôles et les amener en contact parfait (voir fig. 201).

Dans le procédé de soudage par bossages, l'effort de compression et le passage du courant secondaire sont localisés à un point ou à des points déterminés par des proéminences ou bossages existant dans l'une des deux pièces à assembler (voir fig. 202).

Tout comme pour le procédé de soudage par points, l'énergie calorifique nécessaire à la fusion d'une portion déterminée des deux métaux est fournie par l'effet Joule d'un courant intense traversant la résistance électrique formée par la résistance propre du volume des deux matériaux compris entre électrodes, et de la résistance de contact de ces deux pièces. La pression à laquelle sont soumises les pièces à souder à l'endroit du bossage, assure l'union moléculaire des deux matériaux portés à la température de soudage au contact des surfaces.

Les bossages, grâce à leur effet de concentration et de répartition, délimitent parfaitement la surface de passage du courant de soudage. Ils assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser. Le courant de soudage passe d'une pièce à l'autre uniquement par le bossage ou par les bossages suivant le cas. Tout au début de la période de soudage, le chauffage est hautement localisé et intense grâce à une densité de courant initiale très élevée. La surface de contact grandit progressivement. Dès que le volume de matière à proximité du bossage atteint l'état plastique voulu, le bossage s'aplatit et les tôles viennent en contact l'une avec l'autre.

Pour obtenir un point soudé de bonne qualité, il est indispensable que le bossage proprement dit et une certaine partie de la pièce en contact avec le bossage entrent en fusion simultanément.

En soudage par bossages, la balance de chaleur, c'est-à-dire l'échauffement régulier et simultané deux deux pièces à l'endroit du joint, doit être considérée avec soin.

En effet, les bossages ont souvent tendance à être le siège d'un échauffement plus intense que la pièce sans bossages, et si l'on ne prend pas les précautions voulues, les bossages pourraient facilement être brûlés alors que la pièce correspondante n'aurait pas atteint la température de soudage.

Les facteurs déterminants dans cette balance de chaleur sont :

— la différence d'épaisseurs ou de masses des pièces à assembler. La pièce la plus épaisse, ayant une plus grande masse, nécessite un temps plus long pour atteindre la température de soudage. Aussi, dans le cas de soudage de pièces d'épaisseurs différentes, le bossage sera pratiqué dans la tôle la plus épaisse.

— la différence de résistance électrique des pièces à assembler.

— la forme géométrique des pièces.

— la conception du bossage.

— le temps de soudage.

Dans beaucoup de cas, il faut utiliser des temps de soudage courts afin de profiter au maximum de la résistance de contact élevée et créer en cet endroit un échauffement intense et rapide.

— le matériau des électrodes en contact avec les pièces à souder, ainsi que leurs formes.

TYPES DE BOSSAGE

Il existe une très grande variété de formes et de dimensions de bossages.

D'une façon générale, les bossages doivent satisfaire aux conditions suivantes, pour remplir efficacement leur rôle :

— La résistance mécanique du bossage et son emplacement lui confèreront une rigidité suffisante afin qu'il ne s'affaisse pas sous l'effet de la pression des électrodes avant le passage du courant et pendant les premières périodes du passage du courant.

— Ils seront de masse suffisante pour porter la pièce avec laquelle ils sont en contact à la température de soudage, sans fusion ou brûlure prématurée.

— Ils seront conçus de telle façon que leur réalisation soit simple, peu onéreuse et que leurs dimensions et formes soient régulières.

Il existe deux catégories de bossages :

a) Les bossages artificiels.

b) Les bossages naturels.

BOSSAGES ARTIFICIELS.

Ces types de bossages demandent une opération mécanique de préparation avant soudage.

1. Bossages ronds ordinaires utilisés pour les assemblages de tôles, pièces embouties, etc.
2. Bossages annulaires ou allongés réalisés également dans les pièces en tôle et embouties.
   Ces types de bossages sont réalisés à la presse par emboutissage.
3. Bossages réalisés dans les pièces massives par tournage, décolletage, fraisage, estampage, etc.

Les bossages ronds ordinaires.

Les bossages ronds ordinaires sont réalisés dans des tôles, pièces pliées ou embouties.

Leur réalisation, qui se fait généralement à l'aide d'une presse est simple et peu onéreuse.

La forme et les dimensions du bossage dépendent de la forme et des dimensions mêmes du poinçon et de la matrice correspondante et de l'effort appliqué sur la tôle pour le former.

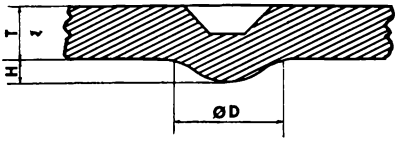


Fig. 203

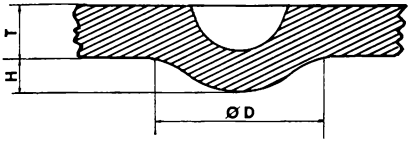


Fig. 204

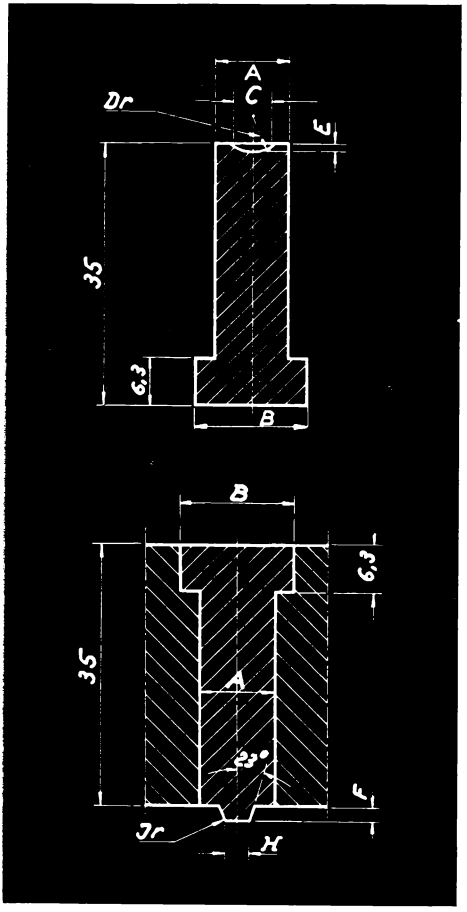


Fig. 205

Poinçon et matrice pour la réalisation de bossages ronds dans une tôle ou pièce emboutie.

Ce type de bossage est généralement de forme sphérique. Il est surtout déterminé par sa hauteur et son diamètre à la base : hauteur H - diamètre D (fig. 203 et 204.)

Suivant la forme des poinçons et matrices, on obtiendra soit des bossages dont la coupe est représentée à la figure 203, soit des bossages dont la coupe est représentée à la figure 204.

La forme du poinçon et de la matrice utilisés pour l'obtention de bossages type figure 203 est donnée à la figure 205. Le tableau ci-dessous donne les dimensions des poinçons et matrices (fig. 205) en fonction de l'épaisseur de la tôle dans laquelle les bossages doivent être pratiqués.

Epaisseur des tôles	A	B	C ± 0,05	D_r	E ± 0,025	F ± 0,025	H ± 0,025	J_r
0,3 à 0,4	9,5	14,5	1,4	0,8	0,4	0,4	0,9	0,12
0,4 à 0,56	9,5	14,5	1,7	1,1	0,45	0,5	1	0,12
0,64	9,5	14,5	2	1,25	0,5	0,65	1,1	0,12
0,8	9,5	14,5	2,4	1,6	0,55	0,75	1,25	0,12
0,9	9,5	14,5	2,4	1,6	0,55	0,75	1,25	0,12
1	9,5	14,5	3	2	0,7	0,9	1,6	0,12
1,25	9,5	14,5	3	2	0,7	0,9	1,6	0,12
1,6	9,5	14,5	4	2,7	0,9	1,1	2,05	0,12
1,8	9,5	14,5	4	2,7	0,9	1,1	2,05	0,12
2	9,5	14,5	4,8	3,25	1,05	1,4	2,55	0,25
2,4	12,5	17,5	5,6	3,75	1,2	1,65	2,8	0,25
2,8	12,5	17,5	6,4	4,35	1,4	1,9	3,5	0,4
3,2	12,5	17 5	7,2	4,9	1,5	2,15	4	0,4
3,6	12,5	17,5	8	5,5	1,7	2,45	4,4	0,4
4	16	20,5	9	6,2	1,8	2,7	4,85	0,4
4,4	16	20,5	9,5	6,7	2	3	5,3	0,4
4,8	16	20,5	10,5	7,25	2,15	3,3	5,6	0,4
5,2	17,5	22	11	7,8	2,3	3,6	6,1	0,5
6,4	20,5	25,5	13.5	9,5	2,8	4,45	7,25	0,6

Pour les bossages type figure 204, les formes des poinçons et matrices utilisés sont représentées à la figure 206.

Les dimensions des poinçons et matrices à choisir en fonction de l'épaisseur de la tôle sont données au tableau ci-dessous (d'après J.F. Harris et J.J. Riley — Welding Journal, Avril 1961).

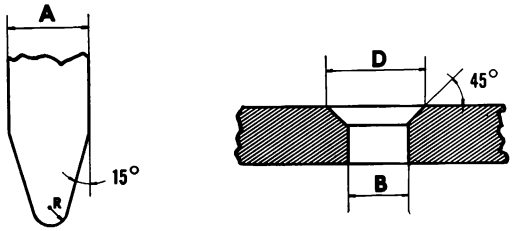


Fig. 206

USS gage	Epaisseurs T mm	Bossages		Poinçon		Matrice	
		Hauteur H ± 2 % mm	Diamètre D ± 5 % mm	Diamètre A mm	Rayon R mm	Diamètre du trou B mm	Diamètre de la chambre D mm
		Pour bossages sphériques					
25–21	0.55 à 0.86	0.64	2.30	9.50	0.79	1.93	2.28
20–19	0.90 à 1.1	0.89	2.80	9.50	1.20	2.25	2.80
18–17	1.24 à 1.38	0.97	3.55	9.50	1.20	2.65	3.30
16–15	1.54 à 1.70	1.06	3.80	9.50	1.58	3.05	3.80
14	1.95	1.22	4.60	9.50	1.58	3.65	4.55
13	2.35	1.27	5.35	12.70	1.98	4.37	5.30
12	2.70	1.40	6.10	12.70	1.98	5	6.10
11	3.10	1.48	6.85	12.70	2.40	5.61	6.85
10	3.40	1.58	7.60	12.70	2.77	6.35	7.60
9	3.90	1.58	8.40	12.70	3.17	6.85	8.40
8	4.15	1.73	8.90	12.70	3.60	7.55	9.15
7	4.55	2.05	9.90	12.70	3.96	8.30	9.90
6	5	2.15	10.40	12.70	3.96	8.60	10.40
5	5.3	2.35	11.20	12.70	4.75	9.10	11.20
4	5.7	2.54	12	12.70	4.75	9.35	12
3	6.2	2.85	13.50	12.70	4.75	10.30	13.40

Bossage annulaire réalisé dans une tôle.

La figure 207 représente un bossage annulaire réalisé dans une tôle ou une pièce emboutie.

Ce bossage permet l'obtention de soudures étanches.

Le bossage annulaire est indispensable dans le cas de tôles de très faibles épaisseurs.

Les bossages sphériques ordinaires conviennent parfaitement s'il sont pratiqués dans des tôles en acier d'épaisseurs supérieures à 0,8 mm.

Pour des tôles en acier d'épaisseurs inférieures à 0,8 mm, il est indispensable d'utiliser un bossage annulaire qui possède une plus grande résistance mécanique à l'affaissement à froid sous l'effet de l'effort des électrodes de soudage.

La figure 208 donne les dimensions des poinçons et matrice pour la réalisation de bossages annulaires dans des tôles en acier doux épaisseurs de 0,3 à 0,6 mm.

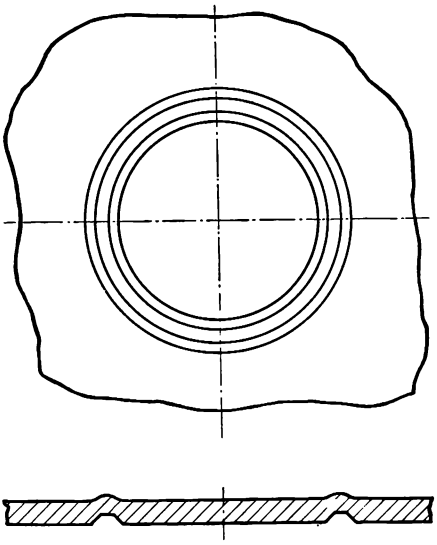


Fig. 207
Forme d'un bossage annulaire réalisé dans une tôle en pièce emboutie.

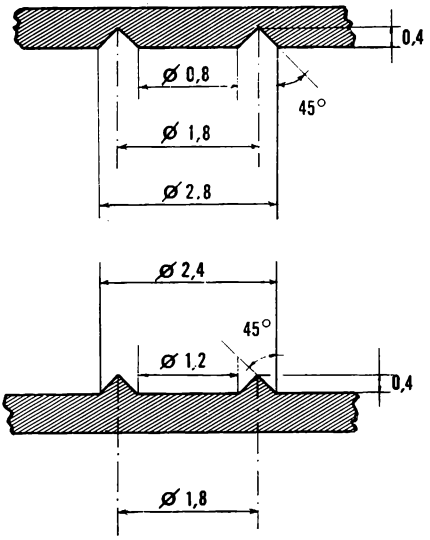


Fig. 208
Dimensions des poinçons et matrices pour bossages annulaires.

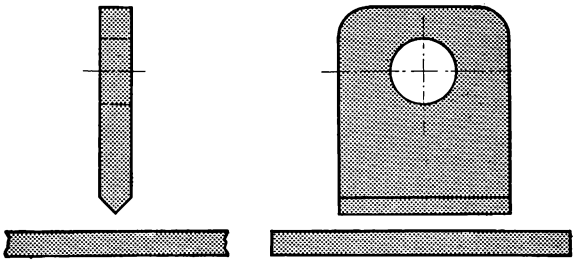


Fig. 209
Bossage linéaire - Section en V.

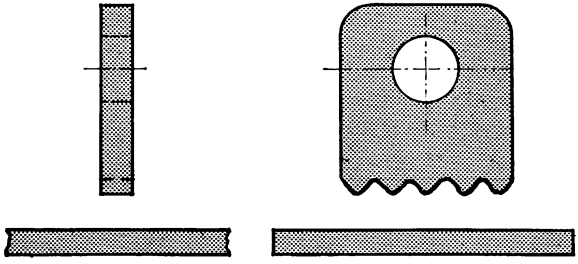


Fig. 210
Bossage linéaire dentelé.

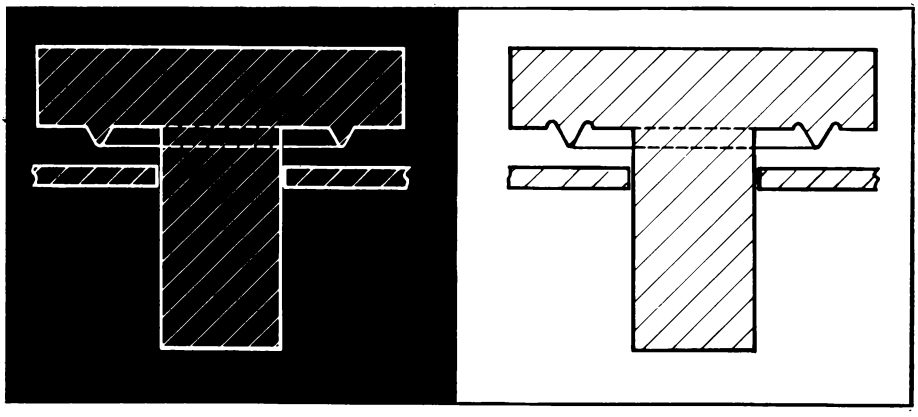


Fig. 211
Bossage annulaire - Section en V - réalisé dans une pièce massive

Fig. 212
Bossage annulaire - Section en V - avec rainure circulaire pratiquée autour du bossage.

Bossages linéaires et annulaires sur pièces massives.

Les bossages linéaires sont réalisés dans des pièces estampées, ou des plats (fig. 209 et 210).

Les figures 211 et 212 montrent des bossages annulaires réalisés dans des pièces massives par décolletage.

La figure 213 donne quelques types de bossages réalisés à l'extrémité de tiges rondes destinées à être soudées perpendiculairement à une autre pièce.

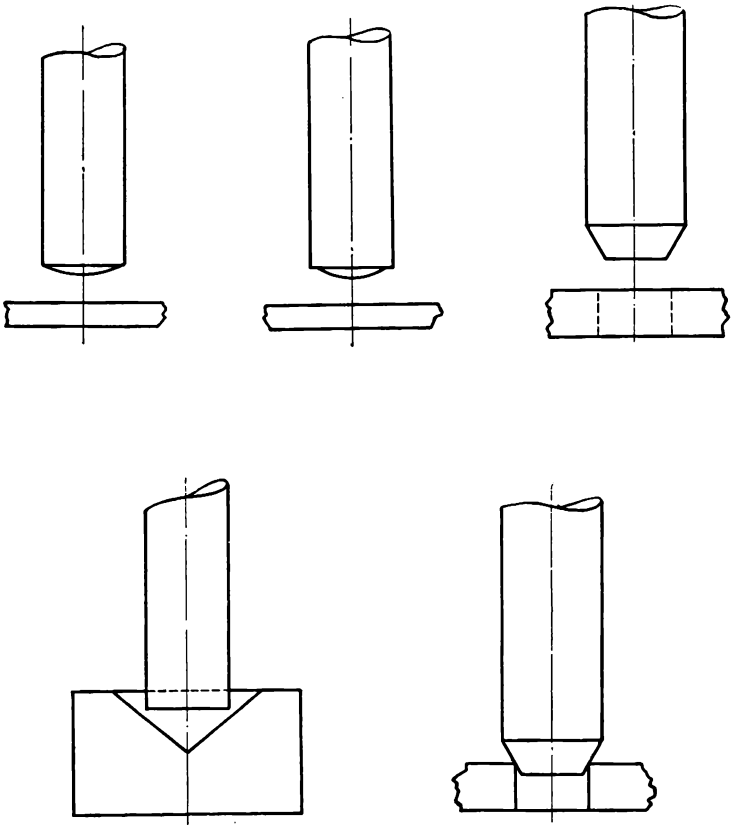


Fig. 213

Quelques formes de bossages utilisés dans l'assemblage d'une tige perpendiculairement sur une tôle ou sur une pièce massive.

BOSSAGES NATURELS.

Par leur forme géométrique particulière, certaines pièces présentent naturellement des bossages. Placées dans une position bien déterminée, ces pièces présentent des zones de contact en saillie qui peuvent par elles-mêmes localiser le passage du courant et permettre la croissance progressive du point soudé à partir de cette ligne ou de ce point de contact.

C'est là un cas très intéressant dont il faut tirer parti.

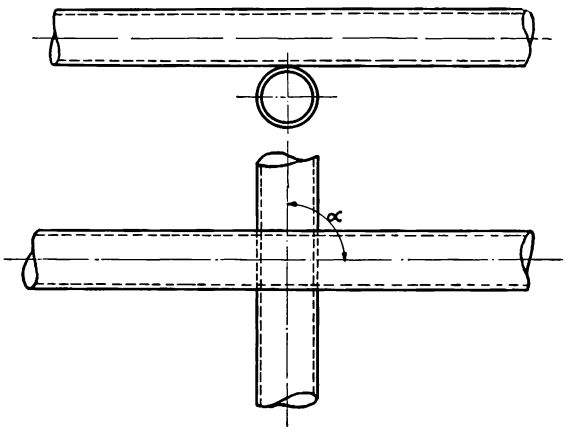


Fig. 214
Tubes posés perpendiculairement l'un sur l'autre (soudage en croix).

Le soudage en croix de deux tubes est un cas bien typique de soudage par bossages naturels. Deux tubes posés en croix l'un sur l'autre comme indiqué à la figure 214 présentent à l'intersection de leur génératrice une zone de contact bien localisée. Réduite à un point avant le passage du courant, cette zone de contact peut croître progressivement en fonction du courant et du temps de soudage, et former un point de soudure de grand diamètre. Deux tubes peuvent être ainsi assemblés en croix, sans aucune préparation préalable.

Les courants secondaires de soudage, les temps de soudage et les efforts appliqués aux électrodes dépendront : du diamètre des tubes et de l'épaisseur de leur paroi, ainsi que de la section soudée désirée, qui conditionne la résistance mécanique de l'assemblage.

Les dimensions des tubes en acier doux couramment utilisées sont les suivantes :

Diamètre : 10 à 40 mm.

Epaisseur : 1,25 à 3 mm.

Des fils ou ronds posés en croix l'un sur l'autre présentent les mêmes particularités favorables aux conditions de soudage.

LES PARAMÈTRES DE SOUDAGE

Les trois principaux paramètres d'une opération de soudage par bossages sont :

— l'intensité du courant secondaire de soudage;

— le temps de soudage;

— l'effort appliqué aux pièces à souder par les électrodes.

Les valeurs de base à donner à ces paramètres sont en principe les mêmes que dans le cas du soudage par points et dépendent des caractéristiques de la matière (en général de l'acier doux en soudage par bossages), de l'épaisseur des pièces à souder, des dimensions des bossages et bien entendu, du nombre de bossages à souder simultanément, de la forme des pièces.

Il faut cependant signaler les points particuliers suivants :

LE COURANT SECONDAIRE DE SOUDAGE.

L'intensité du courant de soudage sera suffisante pour provoquer la fusion du bossage avant son affaissement.

Pour les épaisseurs de tôle moyennes et fortes, l'intensité du courant de soudage peut être choisie entre des limites assez grandes.

Pour les faibles épaisseurs (épaisseurs inférieures à 0,7 mm) la zone des valeurs correctes de l'intensité du courant de soudage et du temps est très étroite.

Les tableaux de réglages de la page suivante (d'après J.F. Harris et J.J. Riley — Welding Journal 1961) donnent des valeurs de courant de soudage pour épaisseurs de tôle de 0,7 à 6,2 mm. Il est évident qu'un grand nombre de valeurs de courant et de temps de soudage quelque peu différentes de celles stipulées dans ces tableaux peuvent également donner lieu à des points de soudure corrects.

L'utilisation d'un appareil électronique de contrôle qui permet l'augmentation progressive de l'intensité du courant de soudage avec le temps, réduit les projections de métal.

SOUDAGE PAR BOSSAGES D'ACIER DOUX

Epaisseurs : 0,70 mm à 3,5 mm

Epaisseur mm	USS gage	Dim. bossages		Espacement min. mm	Recouvrement min. mm	Temps de soudage Périodes	Effort aux électrodes kg	Courant de soudage A
		Diamètre mm	Hauteur mm					
0,7	23	2,3	0,64	10	6,5	3	88	5 500
0,86	21	2,8	0,89	12,5	9,5	3	110	6 600
1,1	19	2,8	0,89	12,5	9,5	5	150	8 000
1,25	18	3,55	0,97	19	12,5	8	180	8 800
1,50	16	3,8	1,06	19	12,5	10	250	10 300
1,95	14	4,6	1,22	22,5	12,5	14	360	11 850
2,35	13	5,35	1,27	27	16	16	460	13 150
2,70	12	6,1	1,40	32	19	19	565	14 100
3,10	11	6,85	1,48	38	20,5	22	680	14 850
3,40	10	7,6	1,58	41,5	22,5	24	750	15 300

SOUDAGE PAR BOSSAGES D'ACIER DOUX

Epaisseurs de 4 mm à 6,2 mm (épaisseurs égales)

Epaisseur mm	USS gage	Dim. bossages		Espacement min. mm	Recouvrement min. mm	Effort de soudage kg	Effort de forgeage kg	U_p slope Périodes	Temps de soudage Périodes	Courant de soudage A
		Diamètre mm	Hauteur mm							
Soudures de dimensions normales										
3,9	9	8,4	1,58	44,5	23	900	1 800	15	60	15 400
4,2	8	8,9	1,73	46	24	1 040	2 080	15	70	16 100
4,5	7	9,9	2,05	48	25,5	1 200	2 400	20	82	17 400
5	6	10,4	2,15	51	26,5	1 320	2 640	20	98	18 800
5,4	5	11,2	2,35	53	29	1 440	2 880	25	112	20 200
5,7	4	12	2,54	58	30	1 640	3 280	25	126	21 500
6,2	3	13,5	2,85	64	33	1 770	3 540	30	145	23 300

LE TEMPS DE SOUDAGE.

La valeur du temps de soudage dépendra de l'intensité du courant de soudage choisie, de la résistance mécanique du bossage, de la forme des pièces à souder.

Les temps de soudage courts exigent des intensités de courant élevées et de ce fait augmentent la tendance aux projections de métal.

Des temps de soudage relativement longs sont indispensables dans le cas du soudage simultané de 2 ou plusieurs bossages, à cause des différences entre les hauteurs des bossages.

Dans le cas de temps de soudage courts, la vitesse de déplacement de l'électrode ou du plateau mobile doit être très élevée.

L'EFFORT DE SOUDAGE.

L'effort de compression doit appliquer fermement le bossage contre l'autre pièce dès les premiers instants du passage du courant. Durant cette phase initiale, la densité de courant de soudage est élevée, l'affaissement du bossage est rapide. Il y aura manque de pression si le mouvement de l'électrode mobile n'est pas suffisamment rapide pour suivre l'affaissement du bossage.

Ce manque de pression se traduit par des projections de métal, des soudures de qualité médiocre et irrégulière dans le cas du soudage de plusieurs bossages.

Des efforts de compression trop élevés donnent lieu à une réduction du diamètre du point de soudure par suite de la diminution de la résistance de contact bossage — tôle et de l'affaissement trop rapide du bossage. Dans ce cas les bossages sont généralement soudés uniquement à la périphérie.

L'effort de soudage doit assurer l'affaissement complet du bossage après soudage.

CYCLES DE SOUDAGE UTILISÉS POUR LE SOUDAGE PAR BOSSAGES DE L'ACIER.

Le cycle de soudage, la puissance électrique et mécanique de la machine, le type d'appareil électronique de commande, doivent être déterminés avec soin pour chaque cas particulier.

Le cycle de soudage le plus simple suffit pour bon nombre de problèmes de soudage par bossages. Il comporte les fonctions suivantes :

— l'accostage, contrôlé ou non contrôlé;
— le temps de soudage, toujours contrôlé d'une façon synchrone ou non synchrone suivant les cas;
— le maintien ou forgeage pendant lequel l'effort sur les pièces soudées est maintenu après la coupure du courant;
— l'intensité du courant de soudage et l'effort de compression restent constants pendant l'opération (fig. 215).

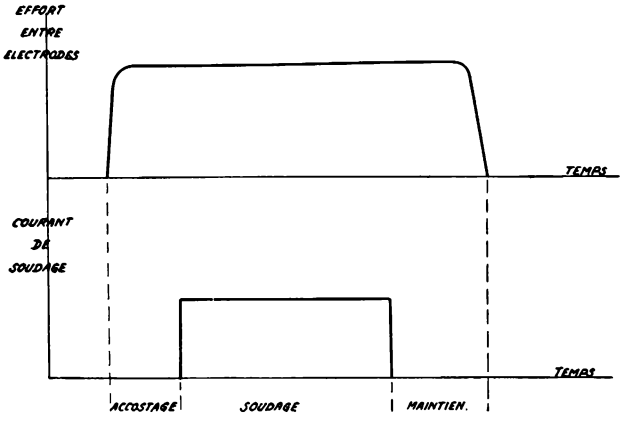


Fig. 215

Cycle de soudage simple. L'effort de compression et le courant de soudage restent constants pendant toute la durée de l'opération.

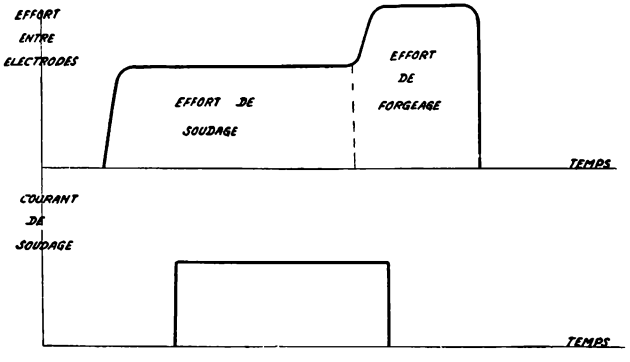


Fig. 216

Cycle de soudage à pression variable et courant constant. Augmentation de l'effort aux électrodes à la fin du temps de soudage et pendant le maintien.

Dans beaucoup de cas d'assemblages, la forme des pièces, les aciers utilisés, les fortes sections à souder, les qualités spéciales de résistance mécanique et de structure métallurgique souhaitées, exigent des techniques plus raffinées si l'on veut obtenir des résultats parfaits.

C'est ainsi que le constructeur de soudeuses est amené à créer des cycles de soudage permettant de coordonner et de faire varier l'effort aux électrodes et le courant secondaire pendant l'opération thermique de la formation du point. Nous analyserons quelques cas de soudage qui nécessitent des cycles particuliers.

En soudage par bossages de tôles épaisses et de pièces massives en acier doux, un cycle de soudage ordinaire avec pression et courant de soudage constants, donne lieu à deux graves inconvénients, si l'on veut obtenir des sections soudées importantes :

a) présence de porosités dans la zone fondue si l'énergie électrique est suffisante pour donner la section soudée exigée;

b) projections de métal en fusion au début de l'opération de soudage, avec expulsion et brûlure partielles des bossages.

Les porosités et cavités dans les points de soudure ont tendance à se former à la fin du temps de soudage. A ce moment, la portion de métal en fusion et dilatée a tendance à s'échapper entre les tôles, et seule une pression suffisante exercée sur ces dernières peut neutraliser cette poussée. Si la pression est trop faible, une certaine quantité de métal est expulsée hors de la zone en fusion, d'où formation de trous. En outre, les conditions métallurgiques de refroidissement du point, le retrait de la zone fondue qui se solidifie, la présence de soufflures dans la soudure et provenant de gaz occlus, exigent le maintien d'une pression élevée pendant le refroidissement.

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire d'appliquer sur la soudure, en fin d'opération, un effort de compression très important, tout en conservant un effort en soudage plus faible, afin d'éviter un affaissement prématuré du bossage et une diminution de la résistance de contact (fig. 216).

Le soudage par bossages de certaines pièces de fortes sections avec pression et courant constants donne lieu à des projections de métal aux premiers instants du passage du courant.

Il résulte de ces expulsions de métal une détérioration ou une brûlure partielle du bossage qui modifie le processus de la formation du point soudé et compromet sa qualité. Deux causes expliquent ce phénomène :

— l'inertie de la tête de soudage mobile qui donne lieu au démarrage à une courte période de compression faible sur le bossage;
— la densité de courant extrêmement élevée dans la zone de contact du bossage qui est très restreinte au début de l'opération.

Les presses à souder de fortes capacités sont équipées d'une tête de soudage nécessairement assez lourde. Dès les premières périodes du passage du courant de soudage, le bossage devient rapidement plus plastique et donc moins résistant. A ce moment, l'équipage mobile doit descendre pour suivre l'affaissement du bossage. L'effort sur le bossage même est momentanément réduit, une partie de l'effort disponible étant nécessaire pour l'accélération de l'équipage mobile. Cette diminution d'effort utile est particulièrement importante au démarrage.

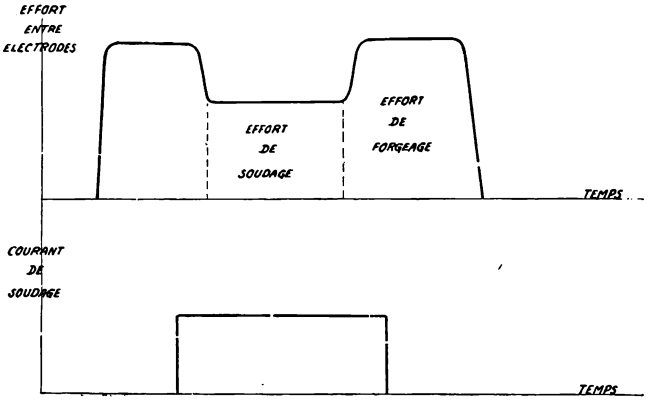


Fig. 217

Cycle de soudage à pression variable et courant constant. Efforts d'accostage et de forgeage supérieur à l'effort de soudage.

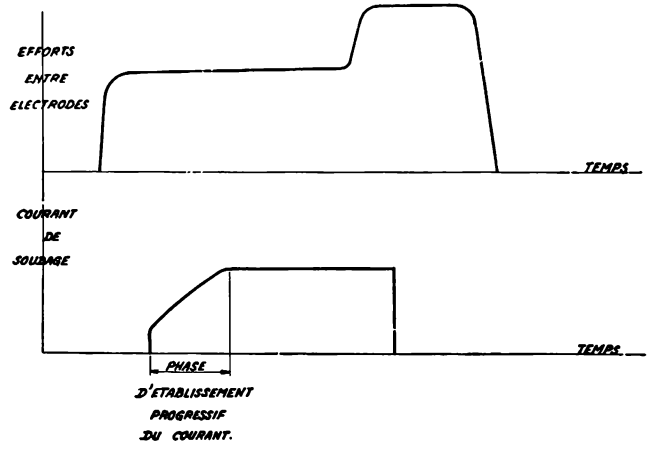


Fig. 218

Cycle de soudage à pression variable et établissement progressif du courant. Le courant est réduit à une faible valeur au démarrage et atteint progressivement sa valeur normale de soudage.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour réduire les projections initiales :

1. Appliquer un effort de compression supérieur à l'effort en soudage pendant l'accostage et les premières périodes de passage du courant. Cet effort initial peut être égal à l'effort final de forgeage (fig. 217).
2. Augmenter progressivement l'intensité du courant de soudage.

Le courant de démarrage étant réduit à une faible valeur, l'échauffement et l'affaissement du bossage sont moins rapides et l'effort de soudage normal est suffisant pour assurer une pression convenable sur le bossage (voir fig. 218). Les aciers doux sont très fréquemment utilisés dans les assemblages réalisés par soudage par bossages. Les soudures obtenues sont de résistance mécanique et de structure métallurgique à peu près identiques à celles du métal de base. Mais cette technique de soudage n'est pas confinée aux seuls aciers doux.

Prenons par exemple le cas des aciers au carbone à teneur en carbone supérieure à 0,30 %. Ces aciers ont une aptitude à la trempe d'autant plus marquée que le pourcentage de carbone est élevé, et une technique de soudage simple ne suffit plus. Dans ce cas, des procédés spéciaux doivent être mis en œuvre. De la martensite, constituant dur et fragile, a tendance à se former dans la zone soudée, pendant la trempe favorisée par l'action refroidissante du métal adjacent au point de soudure.

La formation de martensite et une dureté trop élevée dans les zones affectées par la chaleur peuvent être évitées par les procédés de soudage suivants :

— le soudage par pulsations;
— le soudage avec préchauffage et recuit (voir fig. 219).

Le but de ces techniques spéciales est d'assurer une vitesse de refroidissement inférieure à la vitesse critique de refroidissement qui forme la martensite et de réaliser un revenu ou recuit de la zone soudée.

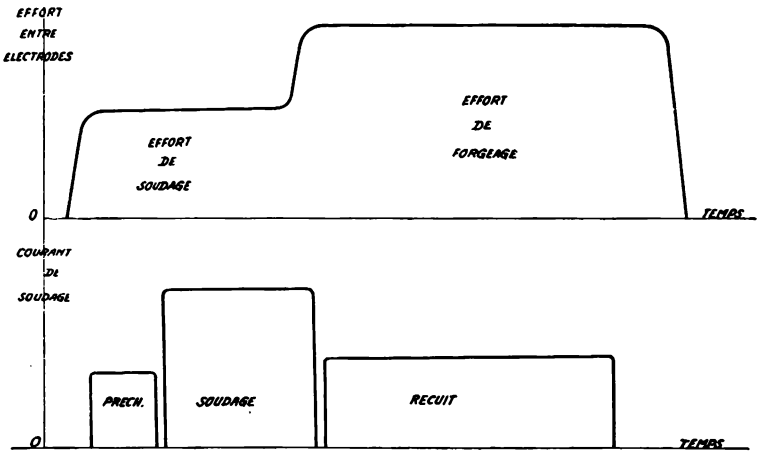


Fig. 219

Cycle de soudage à pression et courant secondaire variables, permettant la préchauffe, le soudage et le recuit; ces trois fonctions étant réglables indépendamment en temps et en intensité.

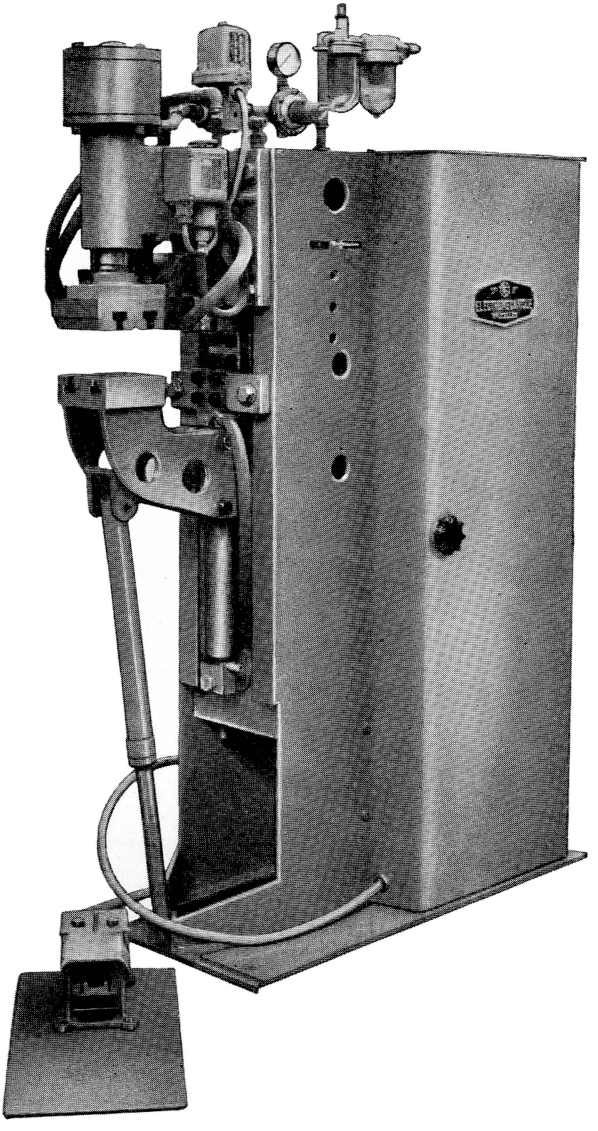


Fig. 220

Presse à souder de puissance maximale de 120 kVA développant un effort de 500 kg.

PRESSES A SOUDER ET OUTILLAGES

PRESSES A SOUDER.

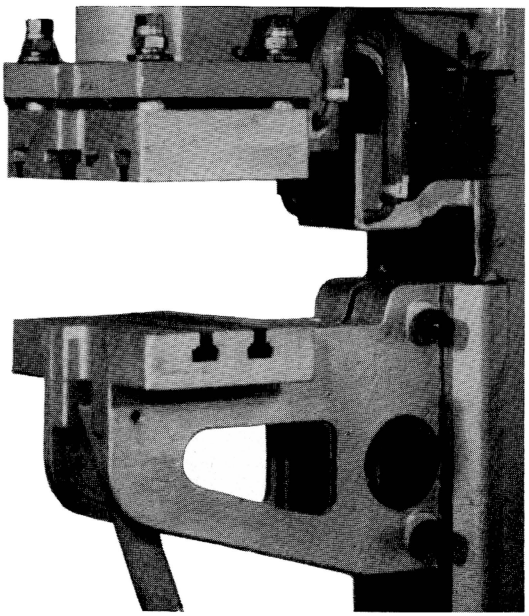
Les soudures par bossages sont exécutées sur des soudeuses-presses qui sont en fait des machines à souder par points plus largement conditionnées au point de vue mécanique et de puissance électrique accrue.

La puissance électrique et l'effort de compression seront déterminés d'après les types de matériaux à souder, leurs épaisseurs et leurs masses, le nombre de bossages à souder simultanément et leur section soudée.

Les presses à souder sont à commande pneumatique, hydraulique ou mécanique.

Les conducteurs supérieur et inférieur sont généralement terminés par des plateaux avec rainures en T qui permettent le montage d'une grande variété d'outillages spéciaux adaptés à chaque cas particulier de soudage.

Les figures 220, 221 et 222 représentent des presses à souder.



Plateaux avec rainures en T.

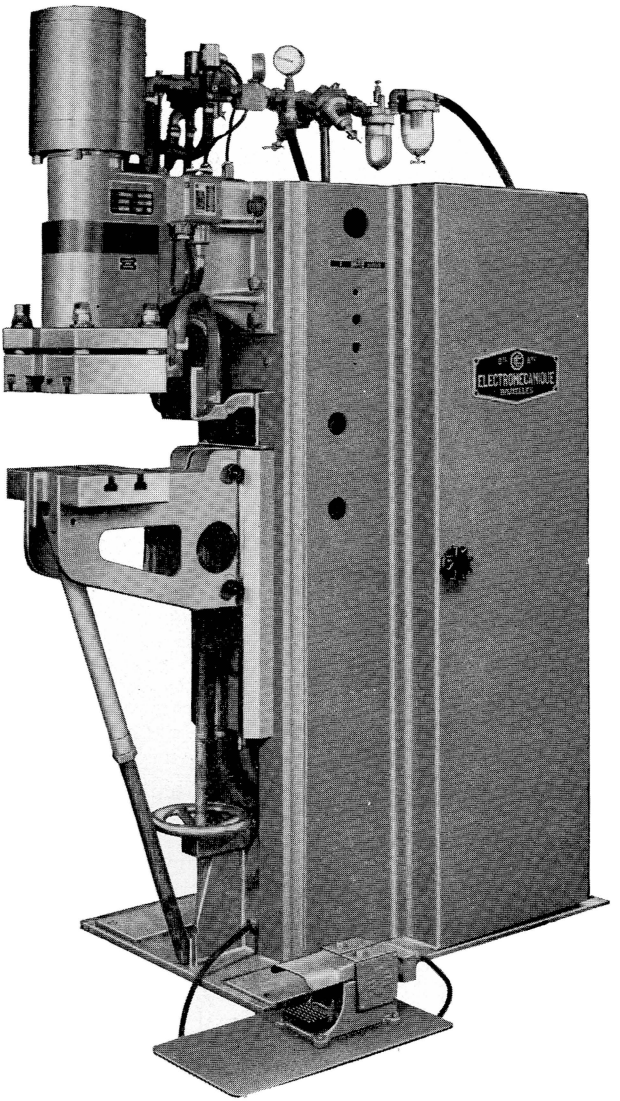


Fig. 221
Presse à souder d'une puissance maximale de 500 kVA, développant un effort de 1 200 kg.

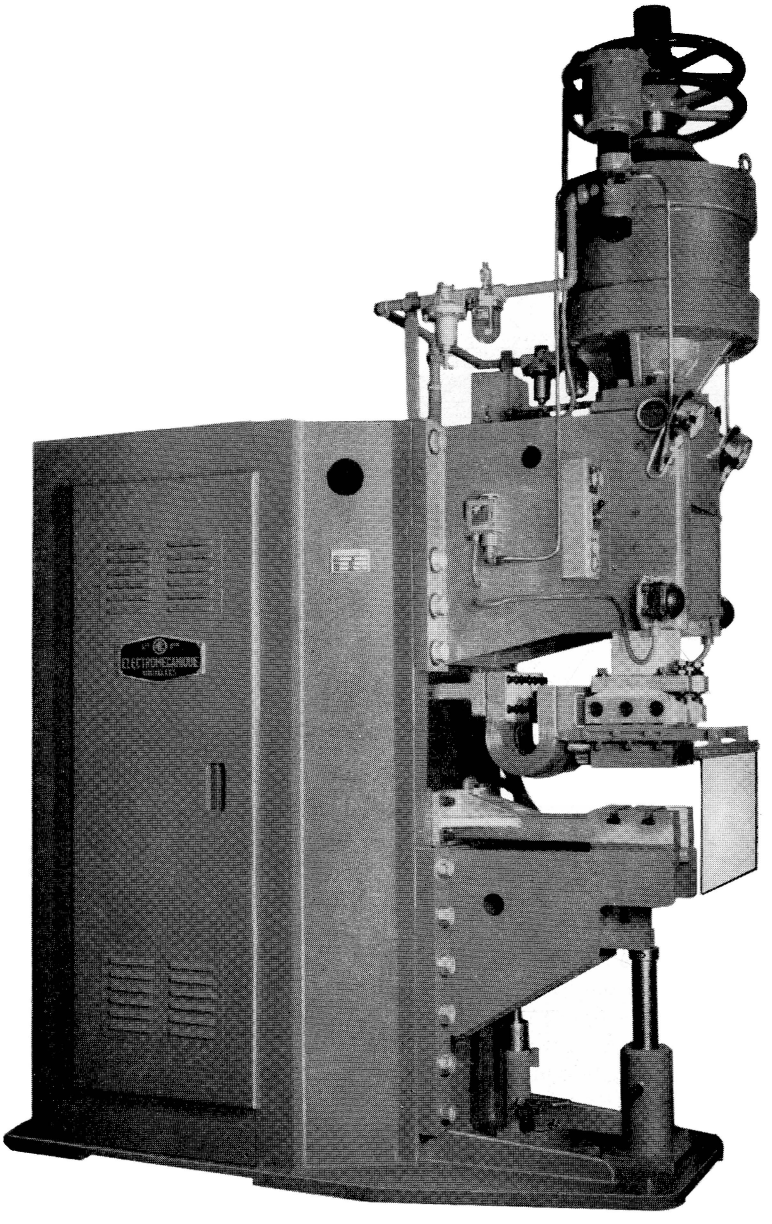


Fig. 222

Presse à souder triphasée de puissance maximum de 500 kVA, développant un effort de 7 000 kg.

ÉLECTRODES - OUTILLAGES.

Trois types d'électrodes sont utilisés :

a) Des électrodes plates de grande surface couvrant totalement la surface occupée par les bossages (fig. 223).

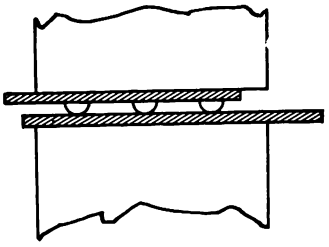


Fig. 223

b) Des électrodes massives pourvues de tétons de localisation du passage du courant et de l'effort de compression aux endroits où se trouvent les bossages (fig. 224).

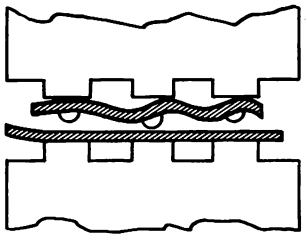


Fig. 224

c) Des électrodes munies d'un dispositif d'équilibrage de l'effort de compression afin d'assurer à chacun des bossages les mêmes conditions de pression et de passage du courant.

Les électrodes plates ne sont pas recommandées pour le soudage d'assemblages déformés et ne conviennent que pour le soudage de quelques bossages sur une surface assez restreinte.

L'électrode avec tétons de localisation donne une meilleure répartition de l'effort et du courant de soudage entre les bossages, même dans des cas d'assemblages déformés.

Des dispositifs de localisation sont souvent nécessaires pour positionner les bossages à l'endroit voulu.

Des étaux de serrage sont également utilisés, par exemple pour le soudage d'un goujon perpendiculairement à une tôle.

QUELQUES APPLICATIONS DE SOUDAGE PAR BOSSAGES.

Soudage d'un étrier sur un plat (bossages ronds ordinaires).

Il s'agit de souder un étrier en acier doux, épaisseur 4,5 mm sur un plat en acier doux épaisseur 8 mm, comme indiqué à la figure 225.

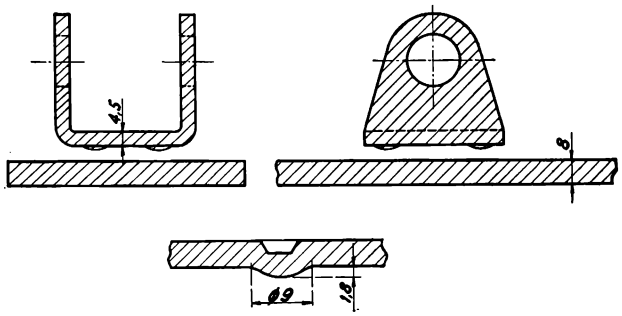


Fig. 225
Etrier à souder sur un plat - forme des pièces - dimensions des bossages.

La figure 226 donne un croquis de principe des outillages utilisés pour cette application.

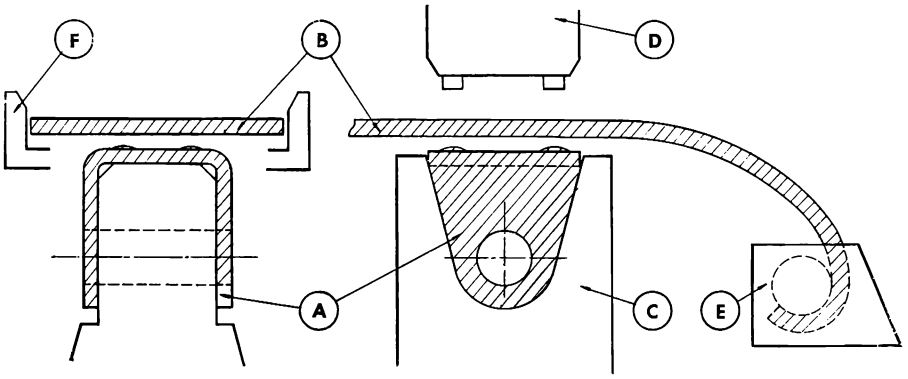


Fig. 226
Croquis des outillages utilisés pour le soudage d'un étrier sur un plat.

A. Etrier;
B. Plat;
C. Electrode inférieure;
D. Electrode supérieure;
E.F. Dispositifs de localisation du plat.

L'opérateur place d'abord l'étrier sur un outillage inférieur muni d'une tige de localisation amovible pénétrant dans les trous prévus dans l'étrier et dans le trou foré dans l'électrode. Le plat est alors déposé sur la pièce inférieure; il est localisé grâce aux deux dispositifs représentés sur le croquis.

La figure 227 donne la photo des outillages réalisés pour cette application. Ils sont fixés sur les plateaux de la machine.

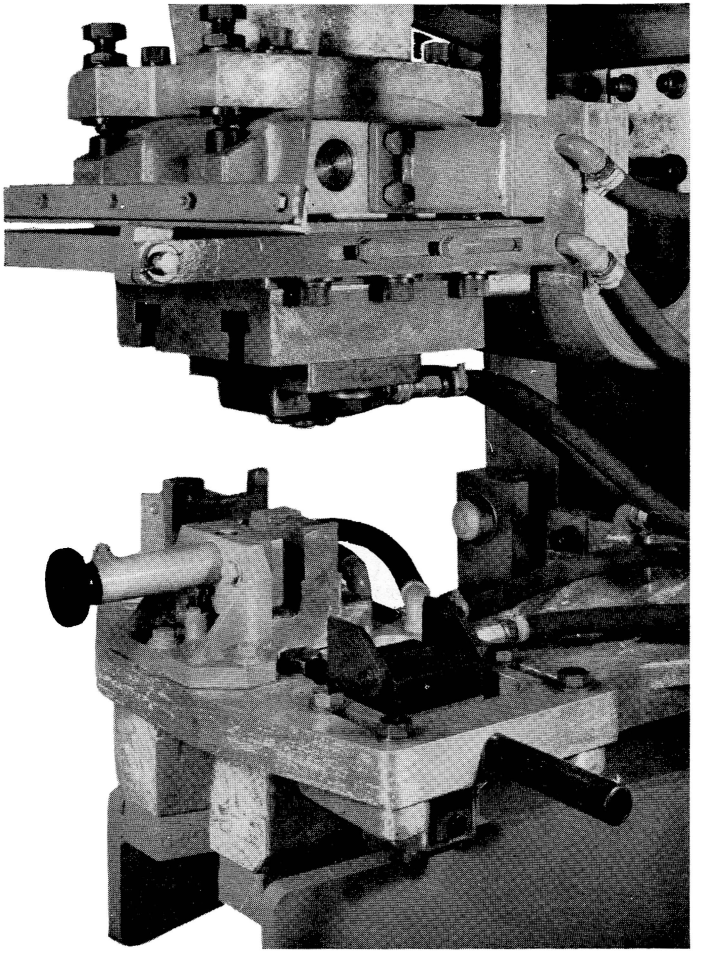


Fig. 227
Outillages réalisés pour le soudage d'un étrier sur un plat.

Soudage d'une pièce en forme d'oméga sur une pièce emboutie (Bossages ronds).

La pièce en forme d'oméga est pourvue de deux bossages (fig. 228).

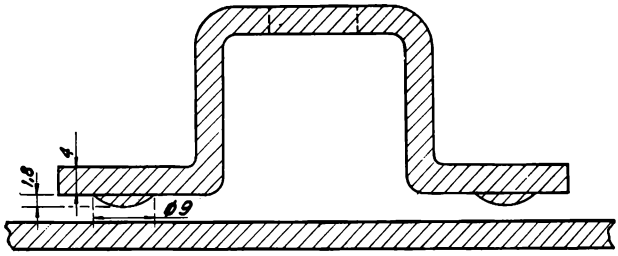


Fig. 228
Pièce en forme d'oméga à souder sur une pièce emboutie.

Elle est déposée dans un support solidaire de l'électrode inférieure, et muni d'une tige de localisation (E) (fig. 229).

La pièce emboutie est localisée à l'aide d'un téton rivé au préalable et par un trou poinçonné au préalable également.

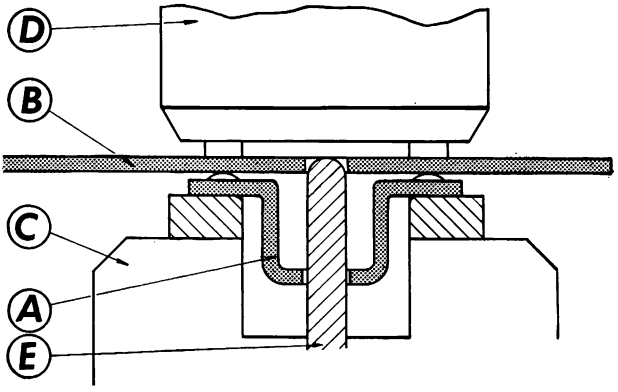


Fig. 229
Croquis des électrodes utilisées pour le soudage d'une pièce en forme d'oméga sur une tôle emboutie.

A. Pièce en forme d'oméga;
B. Tôle emboutie;
C. Electrode inférieure;
D. Electrode supérieure;
E. Tige de localisation.

Les outillages sont représentés par la photo de la figure 230.

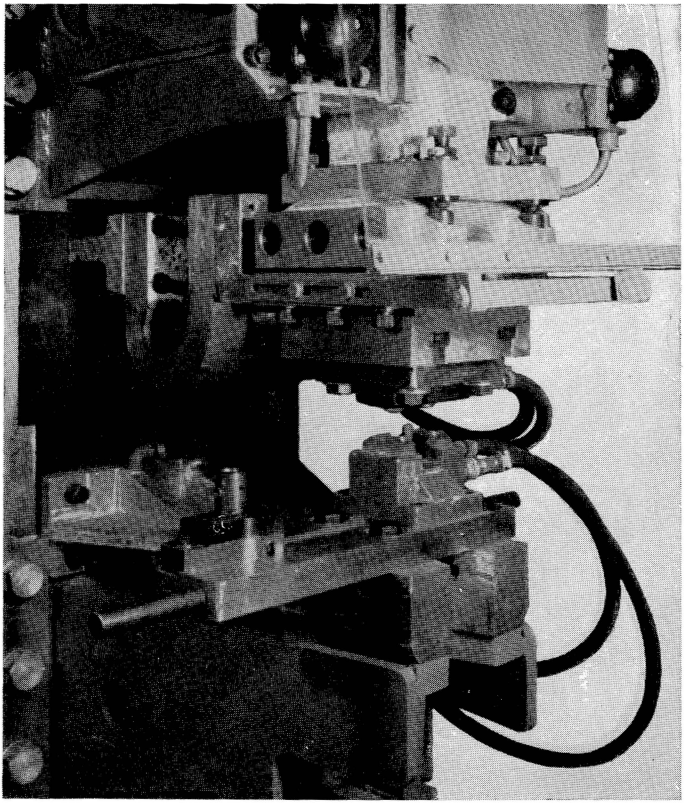


Fig. 230

Outillages réalisés pour le soudage d'une pièce en forme d'oméga sur une pièce emboutie.

Soudage de plats, tôles, pièces embouties sur tubes.

Le soudage par points de tôles minces sur tubes se réalise sans difficultés. Il est cependant nécessaire d'utiliser des machines permettant le soudage en des temps courts pour éviter l'affaissement du tube et la déformation de la tôle. Par contre, le soudage de tôles plus épaisses, de l'ordre de 2 mm, sur tubes à paroi d'épaisseur 1,2 à 2 mm ne peut plus se réaliser par le soudage par points ordinaires. Dans ce cas, il est impossible d'obtenir un accostage correct tube-plat et il est impossible de localiser le passage du courant et la pression sur une surface délimitée, par une seule électrode en contact avec la tôle épaisse. Il est alors indispensable de prévoir des bossages dans le plat, bossages qui délimiteront parfaitement les surfaces de passage du courant (fig. 231). Les soudures obtenues sont de bonne qualité et régulières, d'aspect extérieur présentable et uniforme (fig. 232 et 233). Le tube n'est pas déformé et la tôle reste bien plane.

Un autre avantage de cette méthode est de pouvoir réaliser plusieurs points de soudure de qualité égale très près l'un de l'autre. Comme le montre la figure 234, la disposition des circuits de passage de courant dans les pièces à souder favorise spécialement les dérivations de courant dans les points soudés en premier lieu.

Un cas d'application de fixation par trois bossages ronds de pattes d'attache en tôle emboutie, épaisseur 1,5 mm sur un tube de diamètre 25 mm - épaisseur 1,2 mm, est représenté aux figures 235 et 236.

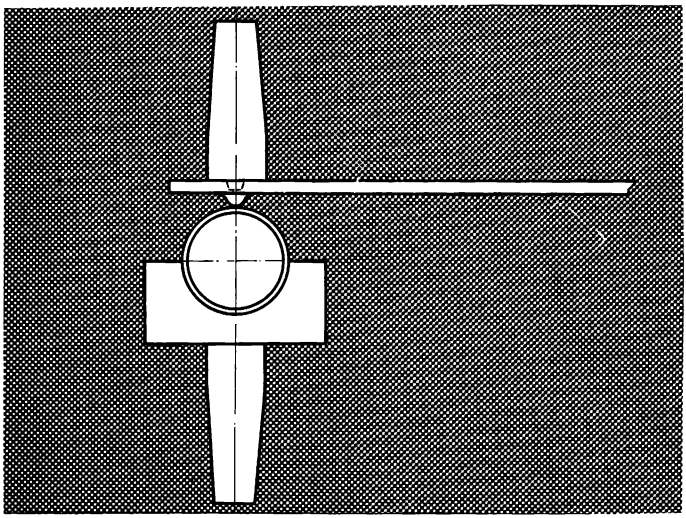


Fig. 231

Principe du soudage par bossages ronds d'un plat sur un tube.
Assemblage placé entre les électrodes de soudage.

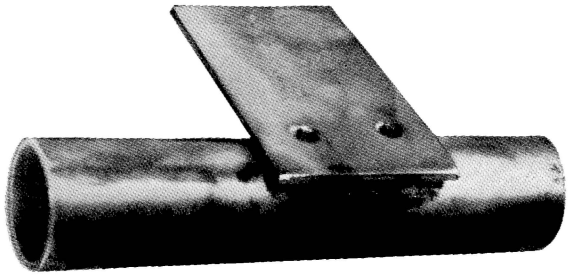


Fig. 232

Photo d'un plat de 40 × 2,5 mm en acier doux, soudé par deux bossages sur un tube de 25 mm de diamètre, épaisseur 1,5 mm. Bel aspect, aucune déformation.

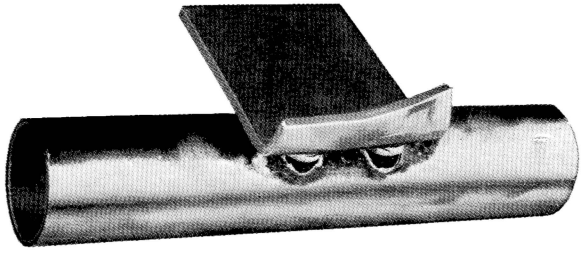


Fig. 233

Photo de l'assemblage montré à la figure 232 après essai de déboutonnage.

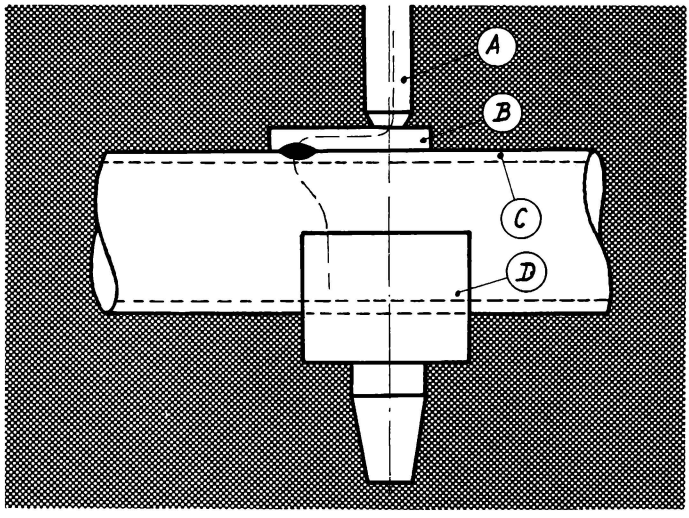


Fig. 234

Soudage d'un plat sur un tube. Croquis montrant l'inconvénient grave en soudage par points ordinaire : dérivations de courants dans les points soudés en premier lieu.

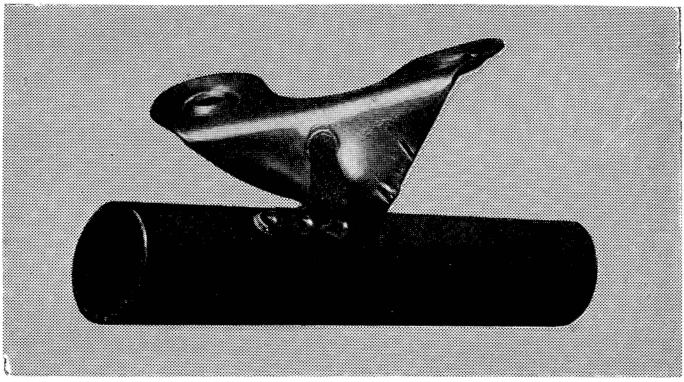


Fig. 235

Assemblage d'une patte d'attache de 1,5 mm d'épaisseur sur un tube en acier doux de 25 mm de diamètre, épaisseur 1,2 mm. Photo de l'assemblage après essai de déboutonnage.

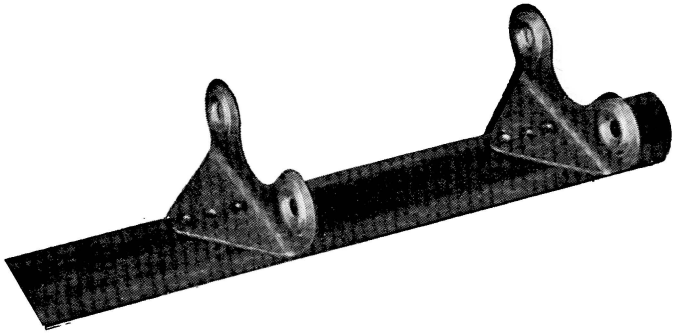


Fig. 236

Soudage par trois bossages ronds de pattes d'attache de 1,5 mm d'épaisseur sur un tube en acier doux de 25 mm de diamètre extérieur, épaisseur 1,2 mm.

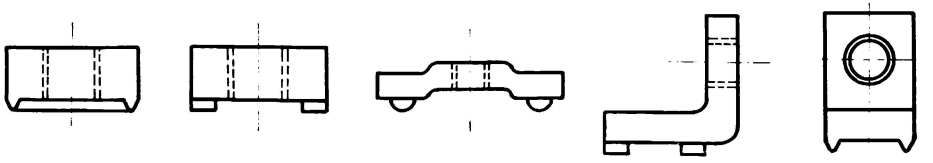


Fig. 237
Croquis de quelques types d'écrous prévus directement avec bossages.

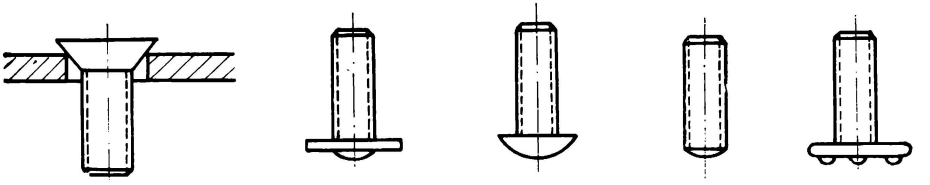


Fig. 238
Croquis de quelques tiges filetées avec bossages pour fixation sur tôles, pièces embouties, etc.

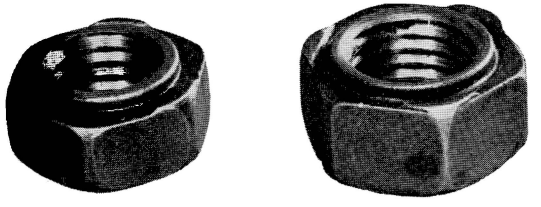


Fig. 239
Photos d'un autre type d'écrou pourvu de trois bossages périphériques et d'une couronne de localisation.

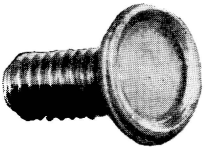


Fig. 240
Photo d'un type de tige filetée avec bossage annulaire.

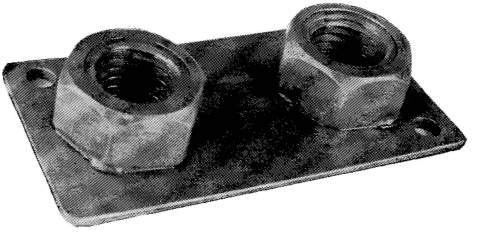


Fig. 241
Photo de deux écrous, type de la figure 238, soudés sur une tôle de 2 mm d'épaisseur.

Soudage d'écrous, tiges filetées.

Dans bon nombre de fabrications (meubles métalliques, carrosseries automobiles, réfrigérateurs) le problème de fixation de tiges filetées, écrous, boulons sur tôles, pièces embouties, plats, etc., est résolu par le soudage par bossages.

Actuellement, il existe dans le commerce, un grand nombre de types d'écrous, tiges filetées prévues avec bossages, le plus souvent obtenus par estampage. Les figures 237, 238, 239 et 240 représentent des croquis et des photos de quelques types d'écrous et tiges filetées avec bossages.

Une photo montrant deux écrous du type de la figure 239 soudés sur une tôle de 2 mm est donnée à la figure 241, tandis que la figure 242 représente ce même assemblage après essai de déboutonnage. On remarquera que les trois bossages de l'écrou de la figure 239 ne se trouvent pas à proximité de la partie filetée. Celle-ci ne court aucun risque de détérioration pendant l'opération de soudage.

Ce genre d'assemblage est en général réalisé à l'aide de soudeuses ordinaires ou de soudeuses-presses de puissance relativement faible, auxquelles il faut adapter des électrodes ou des outillages spéciaux. La bonne conception des outillages a une influence prépondérante non seulement sur la qualité des soudures mais aussi sur la cadence de production. Ils doivent permettre un positionnement et un enlèvement rapides des pièces.

Les croquis de quelques électrodes spéciales utilisées pour ce genre de travail sont représentés aux figures 244 a, b, c, d.

Pour le cas d'assemblage donné à la figure 244 d les électrodes sont simplifiées; l'écrou est pourvu d'une petite couronne de centrage qui s'introduit dans le trou de la tôle et le positionne ainsi automatiquement.

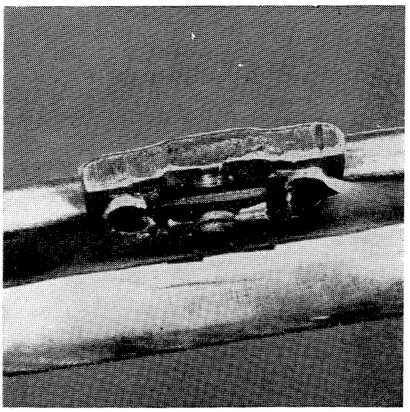


Fig. 242

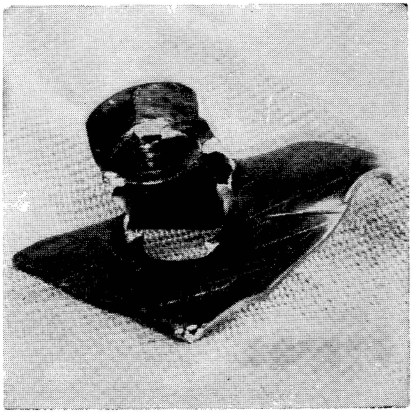


Fig. 243

Photos d'assemblages d'écrous sur tôles après essais destructifs de déboutonnage.

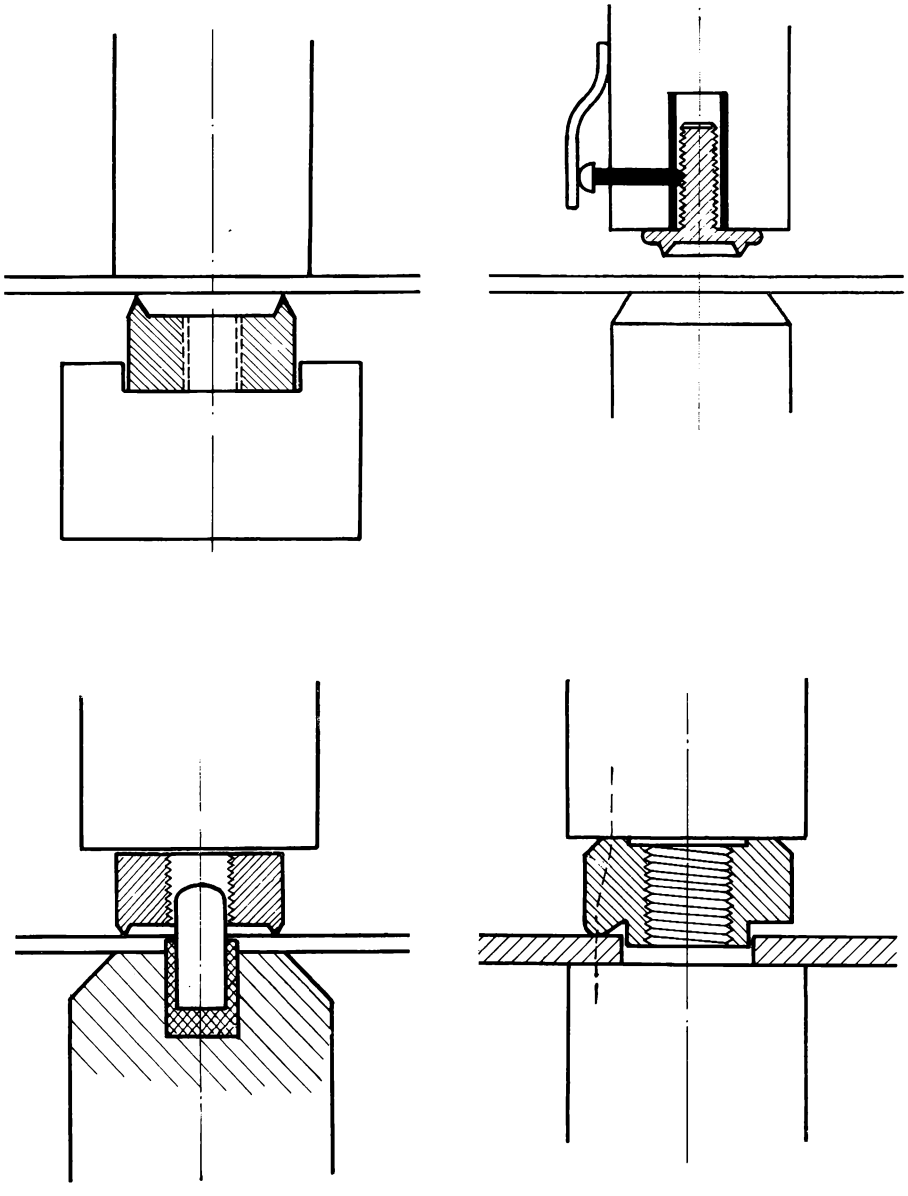


Fig. 244

Croquis de quelques électrodes spéciales utilisées pour le soudage d'écrous et de tiges filetées.

Soudage de fourches aux deux extrémités d'une tige.

La figure 245 donne le croquis de ces pièces à assembler et le détail du bossage pratiqué aux extrémités de la tige. La figure 246 est un croquis des électrodes.

La tige est serrée dans un étau pneumatique disposé sur le plateau inférieur. La localisation de cette pièce est faite indépendamment du serrage. Pour la première soudure, elle est butée à son autre extrémité par une simple pièce fixée au socle de la soudeuse. Pour la deuxième soudure, il faut assurer le positionnement à angle droit des deux fourches terminales. La butée simple servant pour la première soudure est remplacée par une pièce de forme sur laquelle vient s'adapter la fourche soudée en premier lieu.

Afin d'éviter le changement fréquent des butées, en pratique, il est préférable d'effectuer une série de premières soudures, puis, une série de deuxièmes soudures.

La fourche est placée dans un outillage supérieur spécial. L'électrode s'introduit à l'intérieur de la fourche qui est localisée et tenue en place par deux tétons escamotables soumis à la pression d'un ressort.

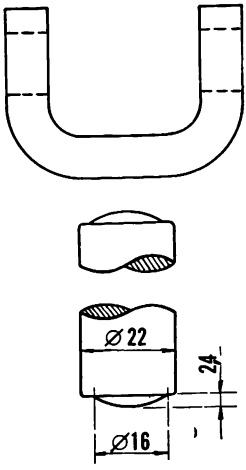


Fig. 245

Croquis d'une fourche à assembler à l'extrémité d'une tige. Détail des bossages.

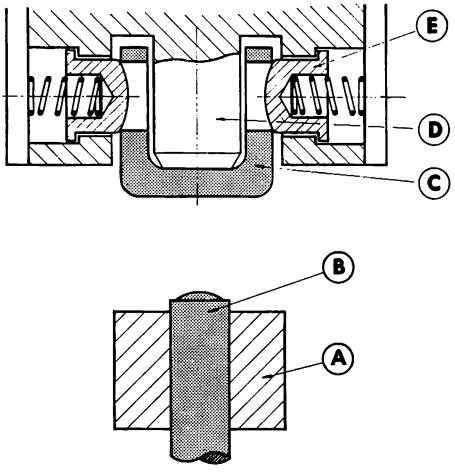


Fig. 246

Croquis des électrodes utilisées pour le soudage de fourches à l'extrémité d'une tige.

A. Etau pneumatique de serrage;
B. Tige;
C. Fourche;
D. Electrode supérieure;
E. Tétons de localisation escamotables.

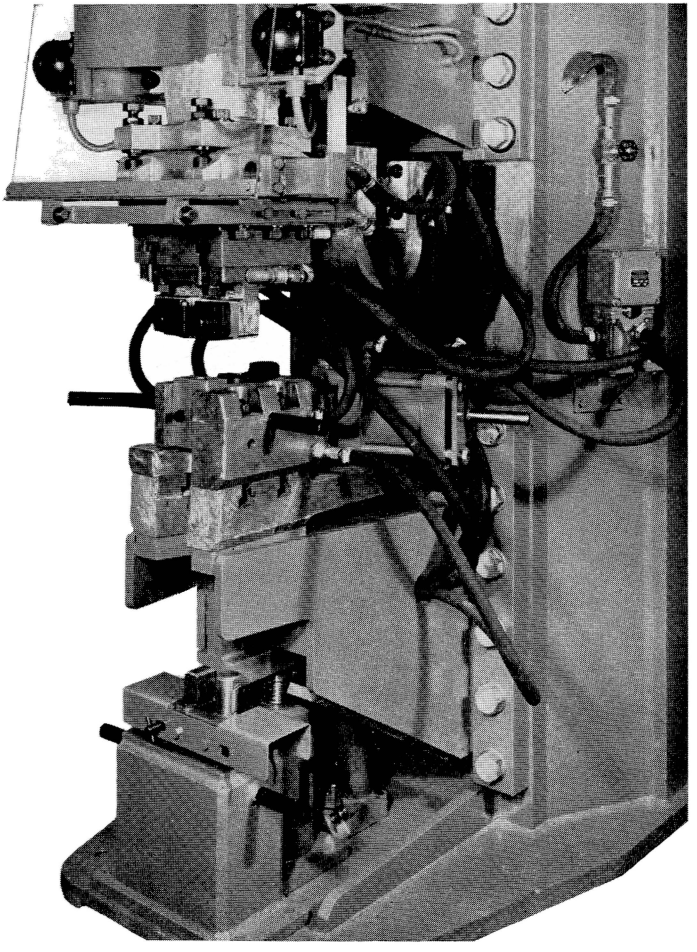


Fig. 247

Outillages réalisés pour le soudage de fourches aux deux extrémités d'une tige.

Soudage d'un bouchon fileté sur un réservoir.

La figure 248 représente le bouchon fileté avec son bossage annulaire. La figure 249 représente le bouchon soudé.

Ce cas de soudage d'une pièce massive sur une tôle mince, nécessite quelques précautions pour arriver à porter les zones de contact des deux pièces simultanément à la température de fusion. Le bossage sera pratiqué dans la pièce massive, car un bossage fait dans la tôle mince serait fondu avant que l'autre pièce n'ait été portée à la température voulue. D'autre part, il sera indispensable de prévoir en contact avec la tôle mince une électrode de forme spéciale en matériau dur de conductibilité électrique et thermique assez faible, au lieu d'une électrode massive en cuivre.

Le principe des électrodes utilisées est donné à la figure 250. L'opérateur place le carter sur l'électrode inférieure en le centrant par une rondelle isolante. Il place alors l'écrou centré par une tige isolée. L'électrode supérieure est une électrode ordinaire plate.

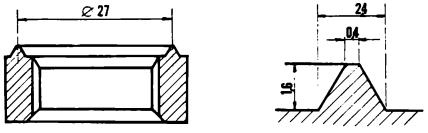


Fig. 248
Bouton fileté avec bossage annulaire. Dimension du bossage.

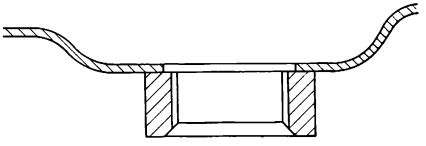


Fig. 249
Bouchon soudé sur réservoir.

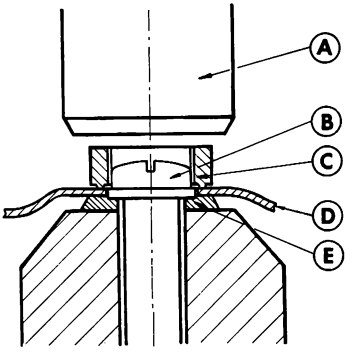


Fig. 250
Principe des électrodes utilisées pour le soudage du bouchon de vidange sur un carter.

A. Electrode supérieure;
B. Tige de centrage de l'écrou;
C. Bouchon;
D. Carter;
E. Electrode inférieure.

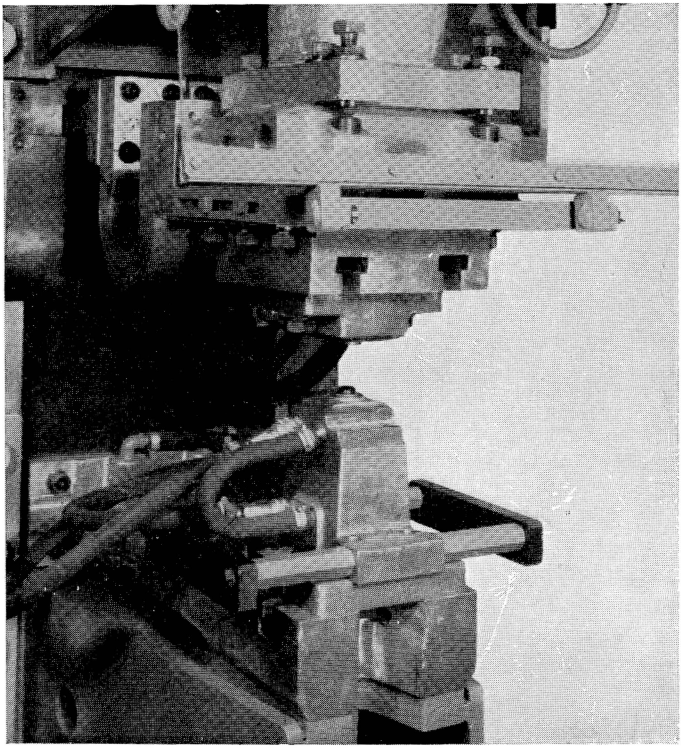


Fig. 251

Photo de l'outillage réalisé pour le soudage du bouchon de vidange sur carters.

Soudage de tubes en croix.

C'est un cas intéressant de soudage par bossages naturels. Il est appliqué dans la fabrication de mobilier métallique (fig. 252, 253 et 254).

Le diamètre du point de soudure réalisant l'assemblage des deux tubes est très grand. La surface extérieure des tubes n'est ni déformée, ni détériorée. Aucune retouche n'est nécessaire après l'opération de soudage.

Les temps de soudage étant très courts (10 à 30 périodes), le dégagement de chaleur est strictement localisé dans la zone de soudure et une très faible portion des tubes est portée à haute température. Cet avantage intéressant permet aux tubes de conserver leurs bonnes qualités mécaniques.

Des tubes chromés peuvent être soudés dans les mêmes conditions. Les surfaces chromées en contact avec les électrodes ne sont nullement détériorées.

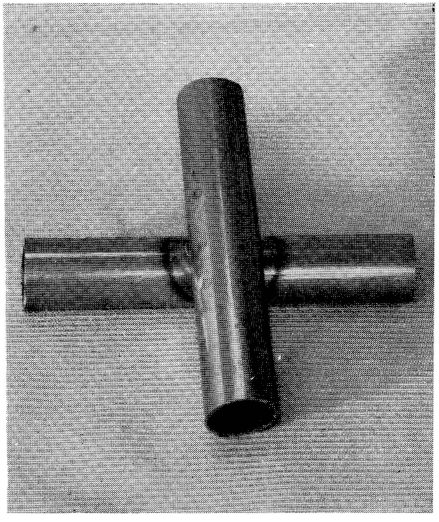


Fig. 252

Photo de deux tubes soudés en croix - tubes de 25 mm de diamètre - épaisseur 1,5 mm - acier doux. Aspect de l'assemblage après l'opération de soudage.

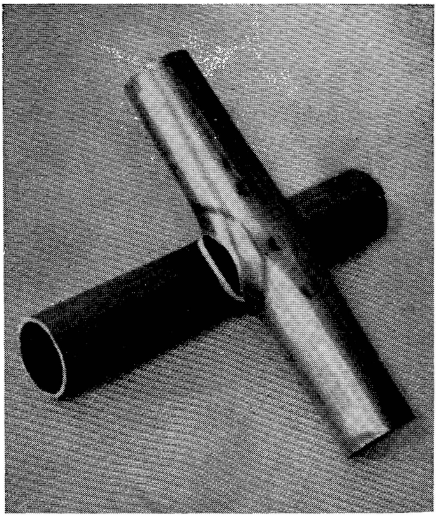


Fig. 253

Photo de deux tubes soudés en croix par résistance après essai de déboutonnage. Un point soudé de grand diamètre extérieur est créé à l'intersection des deux tubes.

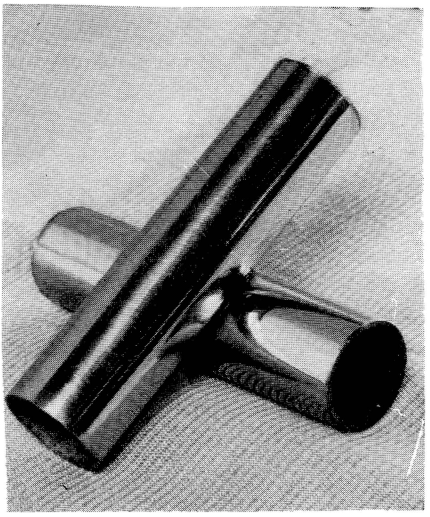


Fig. 254

Photo de deux tubes chromés soudés en croix par résistance. Aucune détérioration des surfaces en contact avec les électrodes.

Soudage de tubes en croix avec préparation.

Le soudage en croix ordinaire donne lieu à une pénétration des tubes l'un dans l'autre d'où il résulte une diminution de l'encombrement en hauteur des deux tubes superposés de 5 à 10 mm suivant les diamètres et les exigences. Mais certaines conditions peuvent exiger que cet encombrement soit réduit à un minimum.

Dans ce cas les tubes à souder peuvent subir à l'endroit de la soudure une préparation spéciale par emboutissage comme indiqué aux croquis de la figure 255.

Deux proéminences de forme cylindrique sont réalisées à l'endroit voulu. La superposition des pièces ainsi formées donne lieu à quatre points de contact, d'où formation de quatre points de soudure en une opération (fig. 256 et 257).

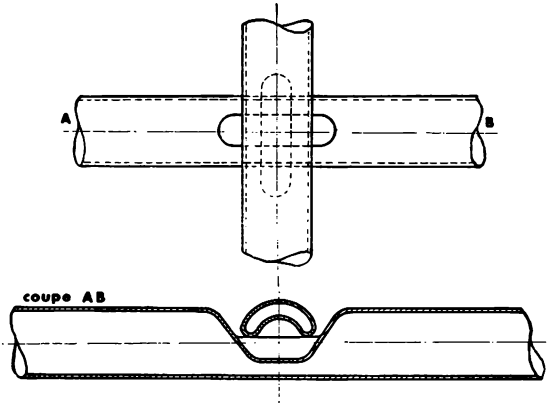


Fig. 255

Croquis de deux tubes préparés spécialement pour être soudés en croix par résistance, avec encombrement minimum en hauteur. Cette diminution de l'encombrement du tube, et la création de bossages sont réalisés à la presse par emboutissage.

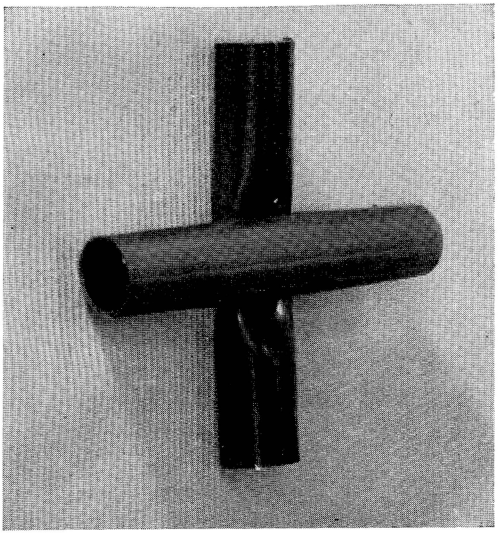


Fig. 256

Photo de deux tubes soudés en croix avec préparation spéciale des tubes à l'endroit déterminé et avant soudage (préparation comme croquis fig. 255). Diamètre des tubes : 25 mm - Epaisseur : 1,5 mm - Acier doux. Aspect de l'assemblage après l'opération de soudage.

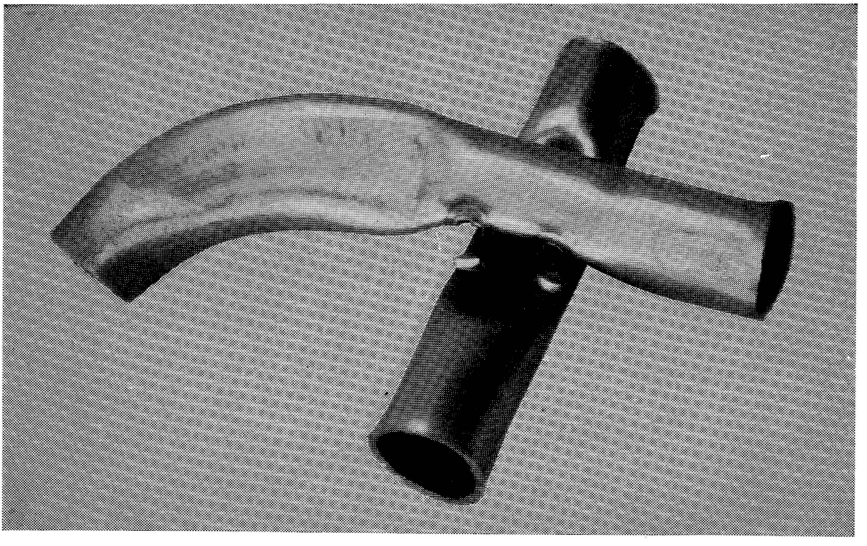


Fig. 257

Photo de deux tubes soudés en croix avec préparation, après essai de déboutonnage. Quatre points soudés prennent naissance à l'intersection des endroits emboutis.

Soudage de fils en croix et de fils sur tubes.

Pour ces applications, des bossages naturels existent aux intersections des pièces. Aucune préparation n'est nécessaire avant soudage.

Le soudage par résistance de fils en croix est appliqué depuis longtemps dans un grand nombre de fabrications. Il fait appel à des machines simples de faible puissance ou à des machines automatiques de grande puissance capables de productions très élevées.

Le soudage en croix par résistance de fils sur tubes est également utilisé dans certaines applications (fig. 258).

Il faut utiliser des temps de soudage assez courts pour éviter l'affaissement du tube et une trop forte pénétration du fil dans le tube qui donne lieu à une augmentation exagérée de la surface de contact.

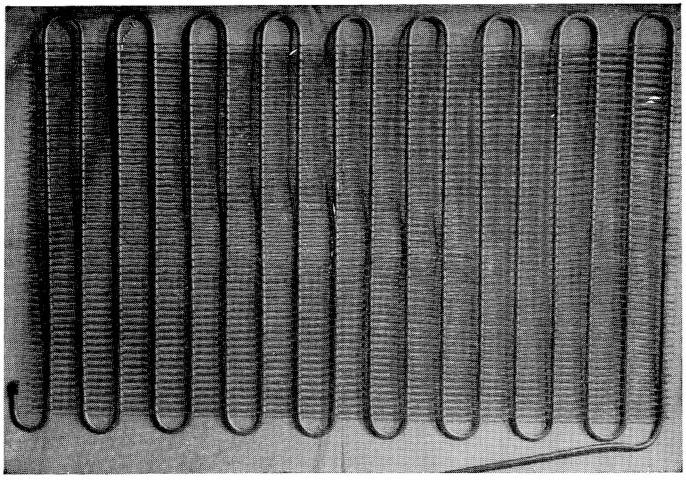


Fig. 258

Application du soudage en croix par résistance de fils sur tubes.
Photo d'un condenseur de réfrigérateur.

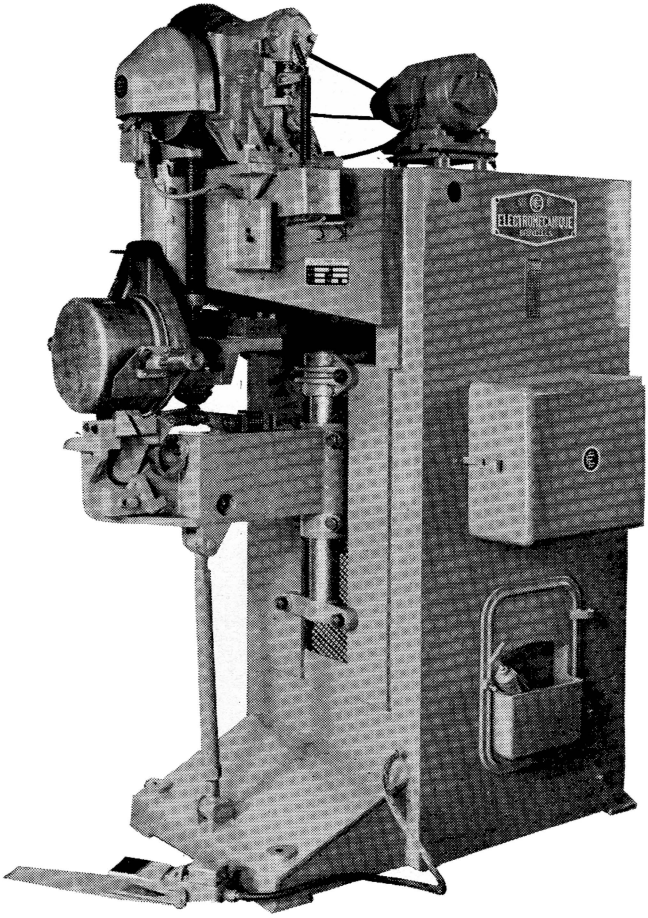


Fig. 259

Presse à souder pour la fabrication d'articles d'émaillerie.

Soudage d'articles d'émaillerie.

Soudage par bossages de manches de poêlons (fig. 260 et 261).

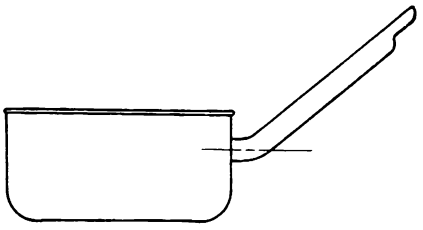


Fig. 260
Principe de l'assemblage.

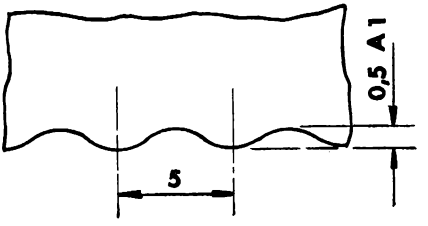


Fig. 261
Forme des bossages.

Soudage d'oreillons de casseroles et de poignées de couvercle (fig. 262 et 263).

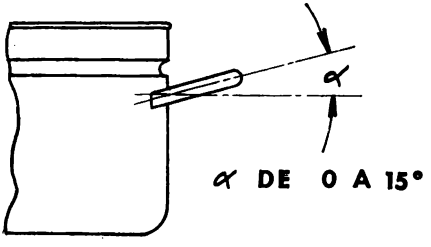


Fig. 262
Soudage d'oreillons de casseroles.

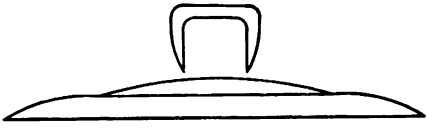


Fig. 263
Soudage de poignées de couvercle.
Principe de l'assemblage.

Soudage de versoirs de théière ou de cafetière (fig. 264 et 265).

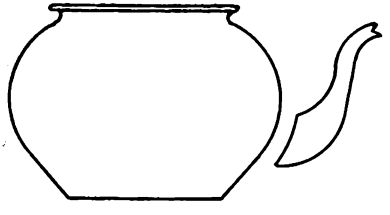


Fig. 264
Soudage de versoirs sur théière.

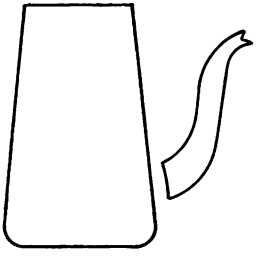


Fig. 265
Soudage de versoirs sur cafetière.

Fig. 266

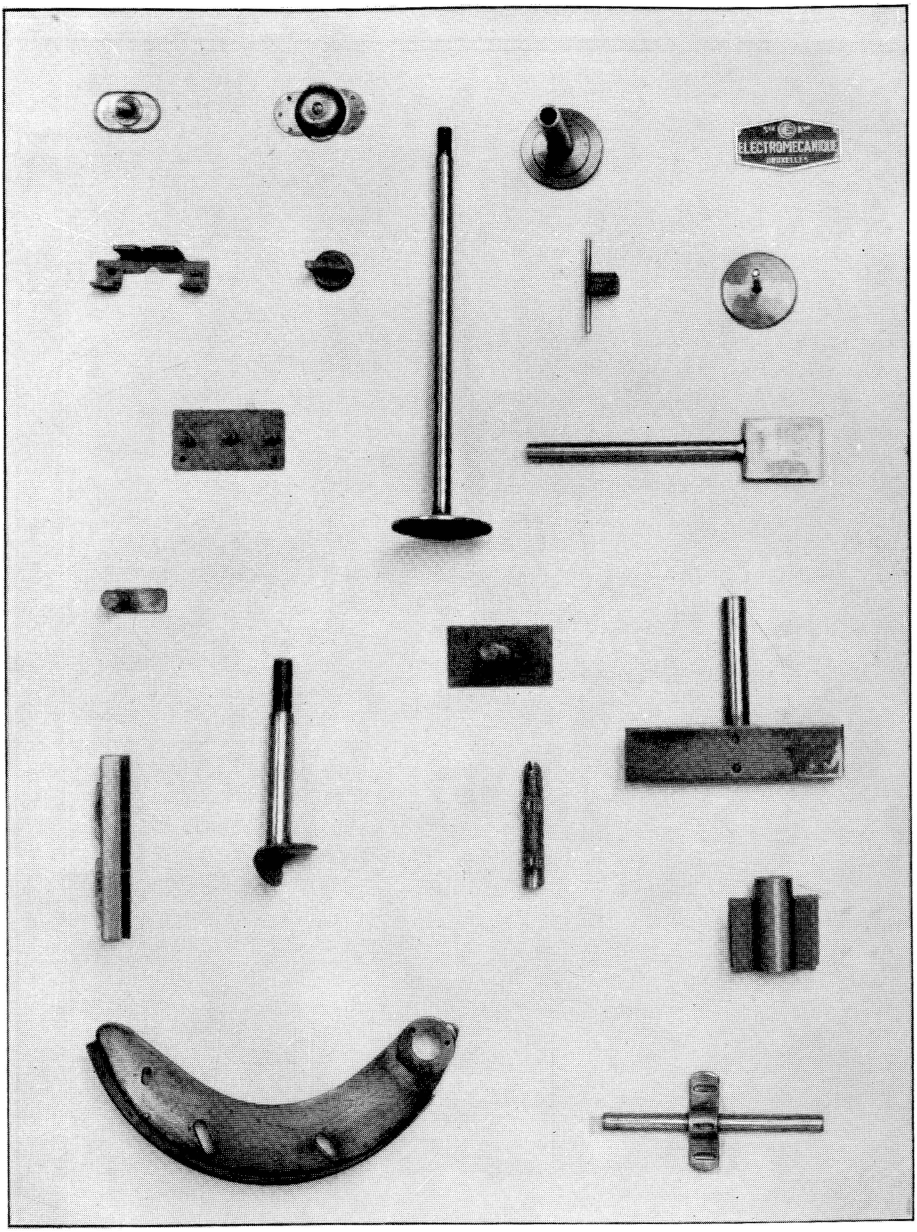


Fig. 267

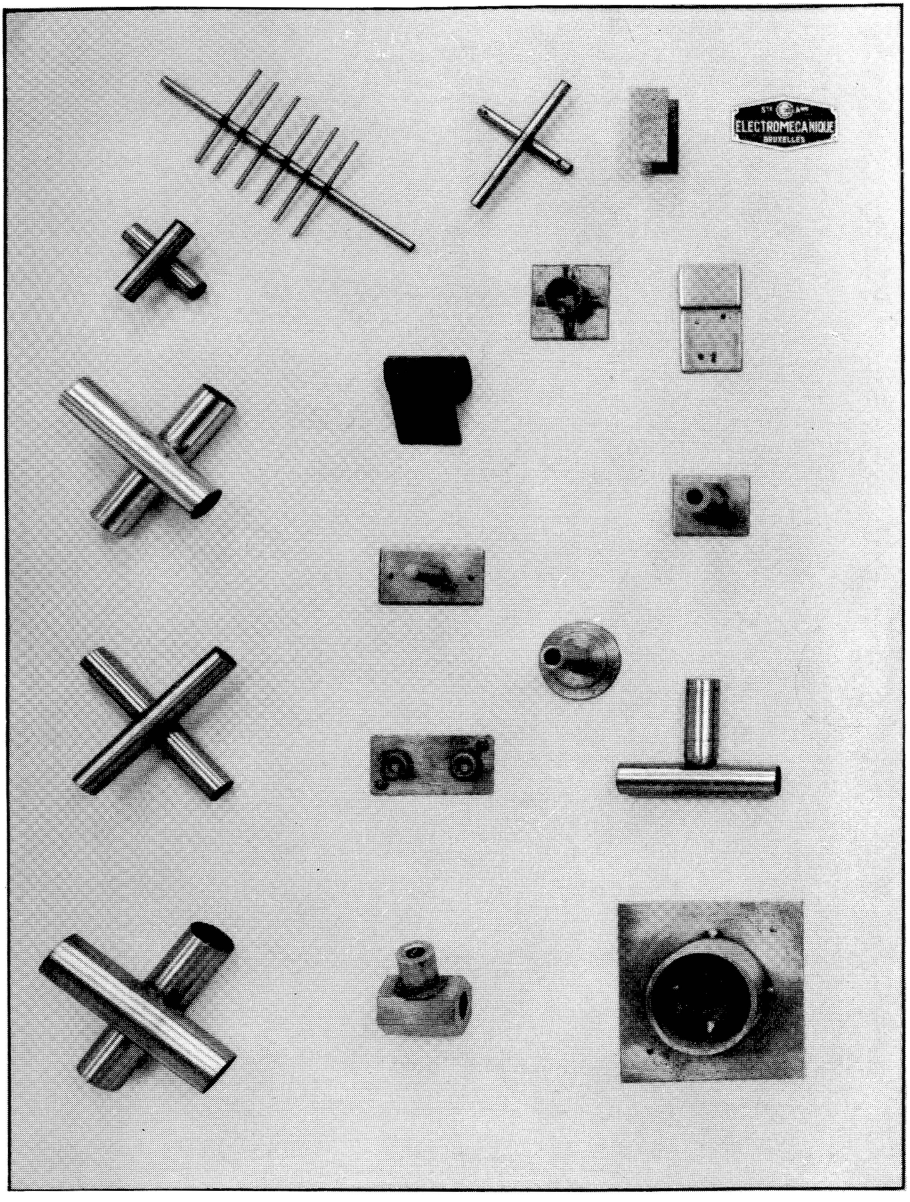


Fig. 268

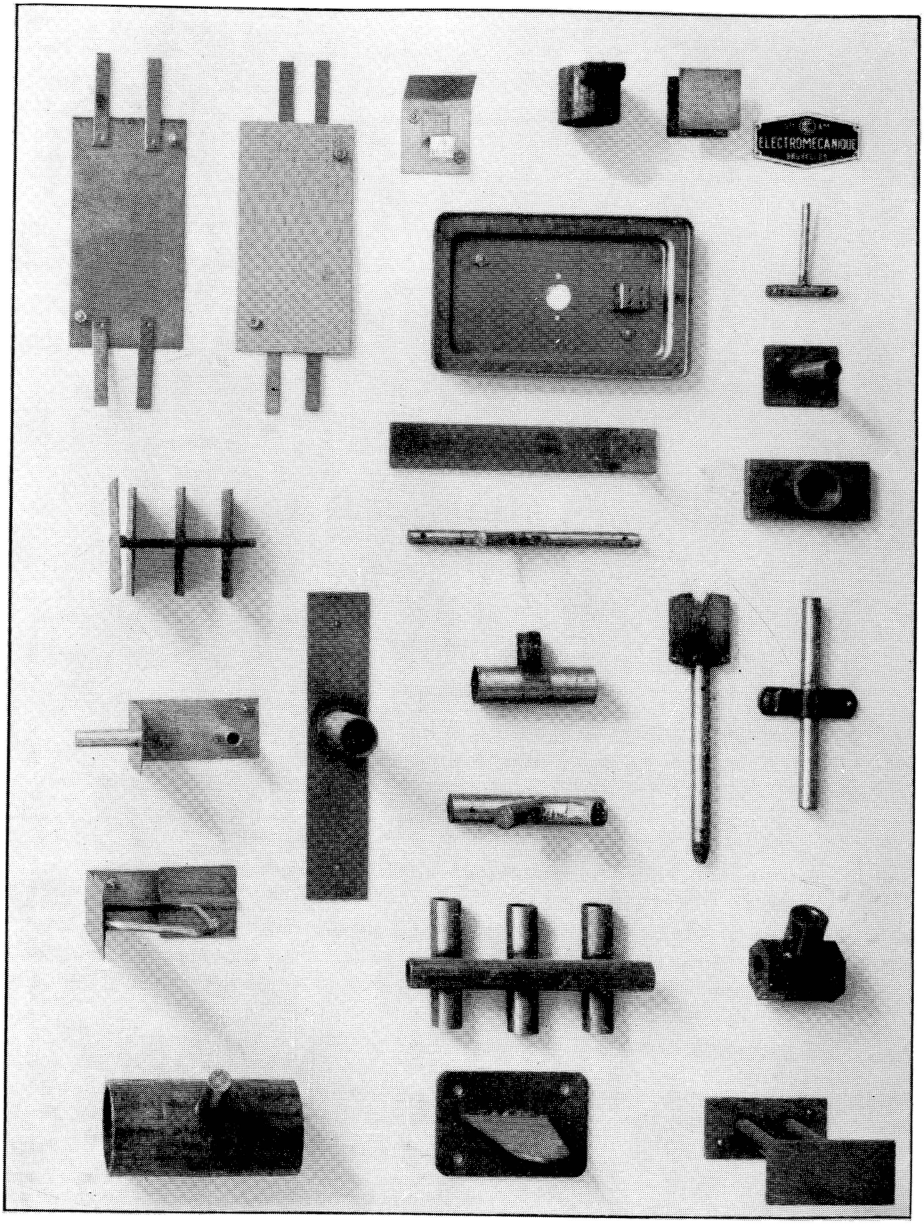


Fig. 269

LE BRASAGE ÉLECTRIQUE PAR RÉSISTANCE

DÉFINITION

Le brasage est une opération d'assemblage de métaux réalisée par interposition entre les faces à joindre d'un alliage d'apport ou brasure. Cette dernière se caractérise par une température de fusion nettement inférieure à celle des métaux à assembler.

Les régions à braser et l'alliage d'apport sont portés dans des conditions déterminées à la température de fusion de la brasure qui par attraction capillaire pénètre ou se distribue plus parfaitement dans l'intervalle existant entre les pièces à assembler. Pendant la solidification, la brasure réalise une excellente liaison par « accrochage » des surfaces des deux métaux.

Le brasage diffère totalement du soudage par résistance :

— Dans le procédé de brasage, les faces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et les métaux restent donc à l'état solide. En soudage par résistance les pièces sont portées à la fusion, en un endroit déterminé.

— En soudage par résistance aucun métal d'apport n'est mis en jeu pour réaliser l'assemblage. Le procédé de brasage exige un métal d'apport non ferreux de composition autre que celle des pièces à assembler.

PRINCIPE

Suivant la nature et la forme des pièces, deux méthodes de chauffage électrique sont utilisées : le chauffage indirect et le chauffage direct.

Généralement les pièces à braser sont insérées entre deux électrodes spéciales de résistance ohmique très élevée. Les électrodes et les pièces à braser avec l'alliage d'apport, font partie du circuit électrique de chauffage. Par le passage d'un courant électrique d'intensité élevée, les blocs chauffants sont portés à l'incandescence et, par conduction, portent les pièces à braser avec lesquelles ils sont en contact, à la température voulue. C'est le procédé de chauffage indirect (fig. 270). L'énergie calorifique dégagée pendant le passage du courant par les pièces à braser est très faible par rapport à l'énergie calorifique dégagée par les électrodes. Cette méthode est la plus généralement utilisée.

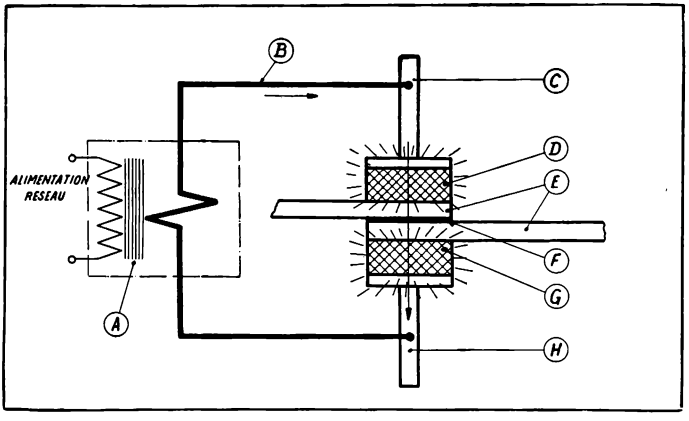


Fig. 270

Schéma de principe d'un poste à braser par résistance.
Parties à assembler insérées entre deux électrodes portées à haute température.

A. Transformateur de brasage.
B. Circuit secondaire dans lequel circule le courant de chauffage.
C. Porte-électrode supérieur.
D. Electrode supérieure en matériau résistant porté à l'incandescence lors du passage du courant secondaire.
E. Pièces à braser.
F. Brasure interposée entre les surfaces à réunir.
G. Electrode inférieure.
H. Porte-électrode inférieur.

Une autre méthode profite de la résistance électrique des pièces à braser elles-mêmes. La chaleur nécessaire est dégagée directement dans les pièces à braser suffisamment résistantes, lors du passage d'un courant électrique intense. Dans ce cas, les électrodes ou mâchoires de serrage utilisées sont généralement en matériau bon conducteur (cuivre, alliages de cuivre...) (fig. 271).

Pendant l'opération de brasage, les surfaces à assembler doivent être sous pression. Cette pression de brasage sert à maintenir et à positionner les pièces pendant l'opération de chauffage ainsi qu'à régulariser le jeu entre pièces; elle doit être maintenue jusqu'à ce que la brasure soit solidifiée et suffisamment refroidie. La pression de brasage est en outre indispensable pour obtenir un contact franc et régulier entre les électrodes et les pièces à braser; ceci assure un passage de courant régulier dans le circuit secondaire et évite les surchauffes ou brûlures locales à la surface extérieure des pièces à braser.

Les paramètres d'une opération de brasage par résistance sont donc : l'intensité du courant électrique de chauffage, le temps de chauffage et la pression. Ce sont en fait, les mêmes paramètres qu'en soudage électrique par points.

Les postes à braser par résistance sont en principe des soudeuses par points fixes ou mobiles dont les tensions et courants secondaires, les efforts de compression entre électrodes, le mode de contrôle du temps de chauffage ont été adaptés aux conditions de brasage.

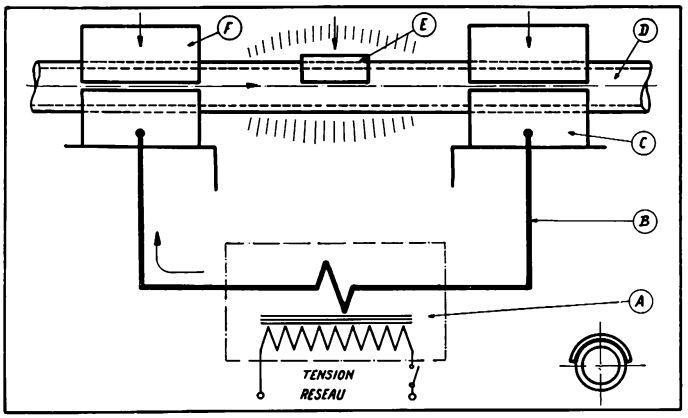


Fig. 271

Schéma de principe d'une machine à braser par résistance par chauffage direct.

A. Transformateur de brasage.

B. Circuit secondaire dans lequel circule un courant électrique élevé destiné à porter la pièce (D) à la température de brasage.

C-F. Mâchoires de serrage qui assurent la liaison électrique entre le circuit secondaire et la pièce (D). Elles sont en cuivre ordinaire.

D. Pièce sur laquelle doit être brasée la plaquette E.

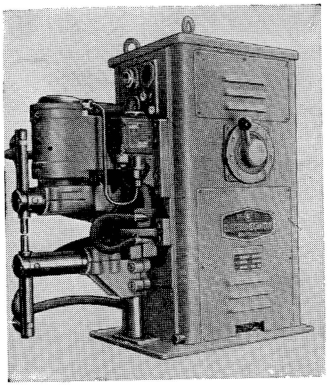


Fig. 272
Petite presse à braser.

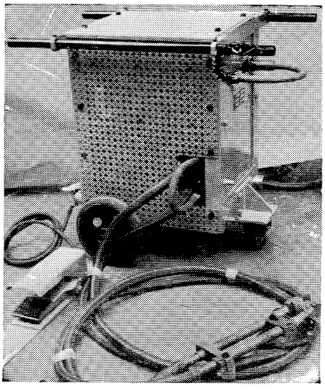


Fig. 273
Poste à braser mobile.

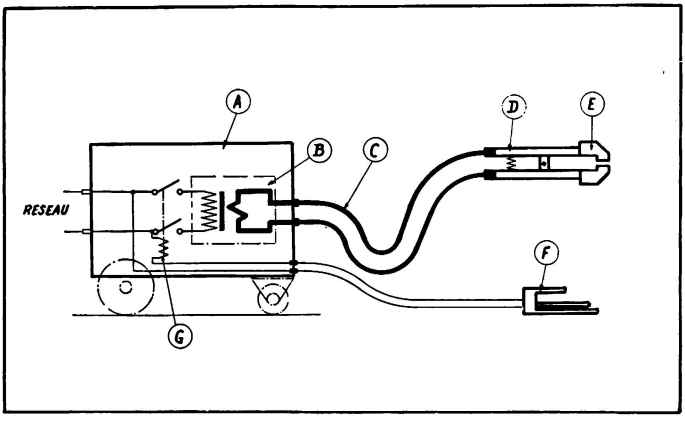


Fig. 274
Schéma de principe d'un poste à braser mobile.

A. Chariot mobile.
B. Transformateur de brasage.
C. Câbles secondaires de raccordement du transformateur à la pince.
D. Pince de brasage.
E. Electrodes chauffantes en carbone.
F. Pédale de commande.

POSTES A BRASER

Les machines utilisées sont suivant l'encombrement des pièces à assembler et les conditions de travail :

a) des postes à braser fixes (fig. 272);

b) des postes à braser mobiles (fig. 273).

Un poste à braser comprend les éléments constitutifs essentiels suivants :

— un transformateur de puissance destiné à fournir au circuit secondaire un courant électrique de chauffage de l'ordre de quelques milliers d'ampères;

— des conducteurs qui relient les spires secondaires du transformateur aux porte-électrode;

— un dispositif mécanique de mise en pression des électrodes;

— un appareillage électrique destiné à enclencher ou couper l'alimentation du primaire du transformateur et ainsi contrôler le passage du courant de chauffage;

— un commutateur de puissance qui sert à régler l'intensité du courant de chauffage.

Les temps de chauffage sont généralement contrôlés à vue par l'opérateur à l'aide d'une pédale de commande, ou contrôlés automatiquement à l'aide d'appareils électriques similaires à ceux utilisés en soudage par points (contrôleur de temps, pulsomat, etc.).

Le circuit secondaire de brasage est généralement constitué par les spires secondaires dans lesquelles est induite une tension de l'ordre de quelques volts, les bras ou conducteurs, les porte-électrode, les électrodes chauffantes, les pièces à braser et la brasure interposée au préalable entre les pièces (fig. 270).

Le dispositif destiné à fournir l'effort de compression entre électrodes peut être mécanique avec système de leviers commandé par l'opérateur ou ressort, ou pneumatique, avec cylindre à air comprimé. Les pressions de brasage sont généralement faibles, toujours inférieures aux pressions nécessitées par le soudage électrique par points. Les postes à braser mobiles sont essentiellement constitués de la même façon que les postes fixes. Ils comportent un transformateur de brasage monté avec son appareillage sur un chariot facilement déplaçable et une pince à braser raccordée au transformateur à l'aide de conducteurs souples (fig. 274). Ces pinces sont manœuvrées et placées à l'endroit voulu par l'opérateur. Vu les faibles pressions exigées par l'opération de brasage, les pinces sont généralement très légères et d'encombrement réduit. Pour cette raison elles sont très maniables et peuvent réaliser des assemblages dans des endroits d'accès peu aisé.

Elles sont généralement suspendues à un système d'équilibrage. La forme des pinces varie avec le genre de pièces à braser. Elles sont généralement du type C ou du type articulé.

Les puissances électriques nécessaires sont généralement plus faibles qu'en soudage par résistance et dépendent :

— de la surface à braser;

— du type d'électrode chauffante utilisé;

— de la conductibilité thermique des pièces à braser, de leur masse et des masses de déperdition adjacente aux régions à braser.

Exemple de caractéristiques de postes de brasage.

Puissance maximum absorbée	5 kVA	10 kVA	20 kVA	30 kVA
Tensions aux bornes des câbles secondaires	6 V-7,5 V	6 V-7,5 V	8 V-10 V	9,5 V-12 V
Mode de refroidissement du transformateur	Air	Eau	Eau	Eau
Section des câbles secondaires pour pinces normales	25 mm²	50 mm²	95 mm²	95 mm²
Longueur normale des câbles secondaires	3 m	3 m	3 m	3 m
Type d'électrode	carbone	carbone	carbone	carbone
Capacité normale de brasage en méplats de cuivre.	300 mm²	500 mm²	800 mm²	1 000 mm²

ÉLECTRODES.

Pour le cas général de brasage, où le chauffage des pièces et la fusion de l'alliage d'apport sont obtenus à l'aide d'électrodes portées à l'incandescence, ces dernières doivent être prévues en matériau de résistivité électrique élevée et de bonne tenue mécanique à haute température.

On utilise très souvent des électrodes en carbone à cause du chauffage rapide qu'elles provoquent. Il existe plusieurs qualités de carbone qui diffèrent par la dureté et la résistivité électrique.

Le carbone dur se détériore moins vite à l'usage que le carbone doux; et sa résistivité est d'environ deux fois plus élevée. Par contre, la résistance de contact est plus élevée, il s'adapte moins bien aux formes des pièces à braser et de ce fait, peut donner lieu plus facilement à des surchauffes ou brûlures locales à la surface extérieure des pièces, à cause d'une mauvaise commutation du courant de chauffage.

La qualité de carbone extra-dur présente l'avantage de nécessiter des intensités de courant secondaire beaucoup plus faibles, mais il est très fragile et sera utilisé uniquement dans le cas de brasage de pièces dont la surface de contact avec l'électrode est plane.

La densité de courant électrique de chauffage nécessaire pour porter le carbone à l'incandescence sera de 1,5 ampère à 2,5 ampères par mm^2 de charbon en contact avec les pièces à braser suivant la qualité de carbone utilisé.

En général, ces blocs chauffants en carbone sont fixés sur des porte-électrode en cuivre ou alliage de cuivre ou sur des montages spéciaux, refroidis par circulation d'eau.

L'elkonite et le molybdène utilisés sous forme de pastilles brasées sur des électrodes en cuivre ordinaire sont également employés comme électrodes chauffantes. Ces derniers matériaux ayant une résistivité électrique moins élevée que le carbone, exigent la mise en jeu de puissances électriques supérieures, mais ils ont une durée d'utilisation plus longue. Ils sont parfois utilisés dons les cas où les pièces à braser elles-mêmes ont une résistivité suffisante pour engendrer pendant le passage du courant, la chaleur nécessaire à l'opération de brasage. Le molybdène est souvent employé pour le brasage de plaquettes de contacts électriques.

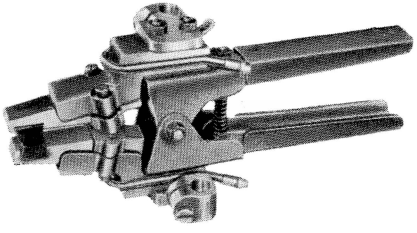


Fig. 275
Pince de brasage.

TECHNIQUE DU BRASAGE

Quel que soit le mode de chauffage utilisé, quelques règles sont à observer et certaines précautions opératoires doivent être prises si l'on veut garantir de bons résultats.

Nettoyage avant brasage.

Les surfaces à braser doivent être bien propres pour assurer une adhérence parfaite de la brasure. Il faudra que les pièces soient débarrassées de toute couche de peinture, de graisse, de calamine, d'oxydes. Le degré de nettoyage dépendra de la nature des métaux à assembler. Par exemple, pour le cuivre laminé, un simple dégraissage suffit normalement.

Brasures utilisées.

Il existe plusieurs catégories d'alliages d'apport. En brasage par résistance, on utilise le plus fréquemment les brasures fortes à l'argent, alliages se composant essentiellement d'argent, de cuivre et de zinc. Elles présentent les caractéristiques suivantes :

— point de fusion assez bas (600 °C à 800 °C suivant la qualité),
— grande capacité de mouillage de métaux variés, qualité indispensable pour assurer un bon accrochage,
— bonne fluidité qui favorise la pénétration dans les espaces capillaires restreints et permet ainsi l'obtention d'un joint brasé régulier,
— bonnes caractéristiques de résistance mécanique,
— résistance à la corrosion très intéressante,
— possibilité de l'utiliser sous formes diverses : baguettes, fils, rondelles, poudres ou rubans.

Flux décapant.

Pendant l'opération de brasage, il est souvent nécessaire d'ajouter un flux décapant. Le rôle de ce décapant consiste :

a) à protéger les surfaces à braser et la brasure de l'oxydation qui est favorisée par la température de brasage, de l'ordre de plusieurs centaines de degrés,

b) à dissoudre les oxydes qui pourraient se former pendant le chauffage,

c) à faciliter la distribution et la pénétration de la brasure en augmentant sa fluidité.

L'utilisation du flux décapant est toujours nécessaire sauf dans le cas de pièces en cuivre pour lesquelles on dispose de brasures auto-décapantes, ce qui constitue un avantage considérable.

Ces décapants existent sous forme de poudre et au moment de l'emploi sont mélangés à un peu d'eau, et placés uniformément sur les surfaces à assembler et leurs abords.

Conditions de chauffage.

Il est bien établi qu'un joint brasé correct ne peut être obtenu que si la brasure et les régions à braser sont chauffées à la température de fluidité de la brasure.

Le « mouillage » de la brasure ne se produira que si les surfaces à braser atteignent une température déterminée et uniforme.

Le mouillage est le phénomène qui caractérise la plus ou moins grande facilité de l'alliage d'apport en fusion à se répandre uniformément sur les surfaces des pièces solides à assembler. Un métal ne mouille pas s'il tend à se contracter en un ou plusieurs points, au lieu de s'étendre sur les surfaces entières.

De la qualité de ce mouillage dépendra la qualité de « l'accrochage » ou pénétration intermoléculaire superficielle entre la brasure et les surfaces à braser.

Les temps de chauffage sont généralement contrôlés par l'opérateur. Bien souvent il est nécessaire de procéder par touches de chauffages successives afin d'éviter des surchauffes et pour uniformiser la température des surfaces à joindre. Ce chauffage par pulsations est indispensable dans le cas de pièces massives ainsi que pour des pièces d'épaisseurs ou de conductibilités thermiques différentes. Dans certains cas, les impulsions de chauffage peuvent être contrôlées automatiquement par un appareil électronique adéquat.

Conception des joints brasés.

Il est à conseiller de faire travailler les joints brasés au cisaillement et d'éviter la réalisation de joints bout à bout. Pour une bonne brasure à l'argent, on peut tabler sur une résistance mécanique au cisaillement de 15 à 18 kg/mm^2. En cas de brasage de méplats, on choisira un recouvrement au moins égal à 3 à 4 fois l'épaisseur du méplat.

Les figures 276 donnent les types de joints fréquemment utilisés dans les assemblages de pièces en cuivre réalisés par brasage par résistance.

Bien souvent on demande à un joint brasé d'assurer une liaison électrique entre deux pièces conductrices. Il faudra donc que la brasure n'introduise pas une résistance ohmique trop élevée. Si la surface brasée est suffisante, et la répartition de la brasure bien régulière, la résistance ohmique des joints brasés n'est pas supérieure à la résistance propre des pièces assemblées.

Jeu à prévoir entre pièces à assembler.

Cette question a été souvent discutée. Le jeu entre pièces détermine l'épaisseur du film brasé, mais il détermine également la résistance mécanique du film.

Le jeu admis varie avec la nature des métaux à réunir, le type d'alliage et les exigences de la qualité de la brasure. Des jeux exagérément faibles nécessitent un usinage coûteux.

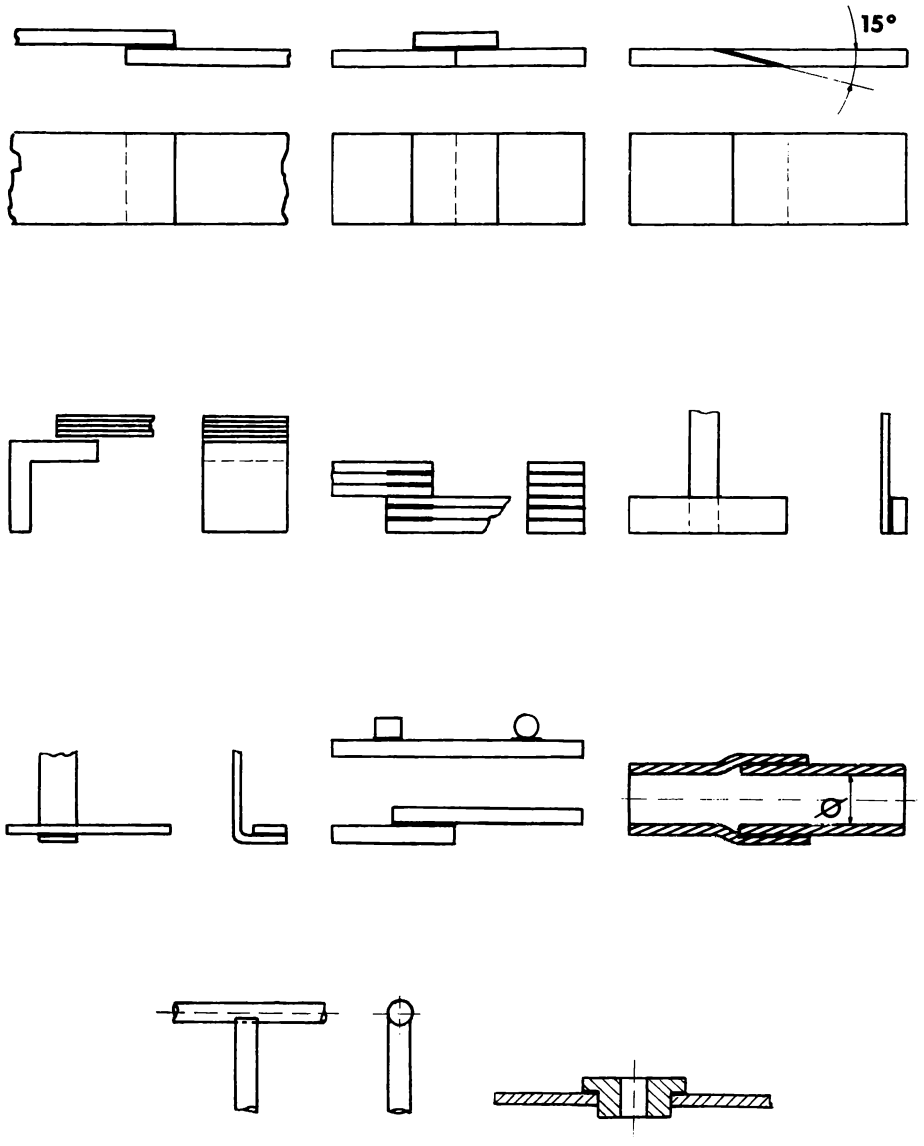


Fig. 276
Quelques types d'assemblages classiques par brasage de méplats, feuillards, etc., en cuivre.

De plus, la brasure en fusion étant distribuée par attraction capillaire, un jeu trop faible peut empêcher la pénétration ou la répartition de la brasure et contrarier l'échappement de gaz développés dans le joint pendant le chauffage. Des jeux trop importants sont encore plus néfastes. En effet, portée à bonne température, la brasure est tellement fluide qu'elle ne pourra assurer le remplissage d'un espace trop important entre pièces. Elle s'en échappera laissant des porosités très nombreuses.

Par contre, si l'on veut assurer le remplissage parfait du joint il faudra amener la brasure à une température qui la laisse à l'état plus ou moins plastique, mais dans ces conditions, l'accrochage ou pénétration moléculaire entre les surfaces et la brasure n'aura pas lieu.

En principe, le jeu entre surfaces à braser ne dépassera pas 0,20 mm.

POSSIBILITÉS ET AVANTAGES DU BRASAGE PAR RÉSISTANCE

Il est évident que tous les problèmes de brasage ne peuvent pas être solutionnés par chauffage par résistance.

En général, les pièces en cuivre sous forme de méplats, feuillards, câbles, fils, tubes, etc., se prêtent bien à ce procédé, parce que les brasures utilisées sont auto-décapantes et ne nécessitent pas, de ce fait, la présence d'un flux décapant supplémentaire pendant l'opération. Il est toutefois nécessaire que la forme et l'encombrement des assemblages à réaliser leur permettent d'être serrés entre deux électrodes chauffantes.

Vu la bonne conductibilité électrique du cuivre, il s'agit presque toujours de brasage par chauffage à l'aide d'électrodes portées à l'incandescence (carbone ou molybdène).

Le courant électrique de chauffage traverse sans inconvénient les différentes épaisseurs à braser et l'alliage d'apport.

Le brasage simultané de plusieurs épaisseurs n'offre aucune difficulté et se pratique couramment dans l'industrie.

Les croquis de la figure 276 donnent quelques exemples d'assemblages classiques de méplats, tubes, feuillards, etc., en cuivre.

Pour les matériaux autres que le cuivre, il est indispensable d'ajouter un flux décapant pendant le brasage. Ce flux décapant est très gênant surtout dans les cas de brasage où les pièces avec leur brasure sont interposées entre deux électrodes chauffantes.

Le courant électrique secondaire doit traverser les pièces à assembler imprégnées totalement ou partiellement de décapant, qui est isolant à froid et risque de provoquer l'interruption du circuit secondaire et d'empêcher ainsi tout chauffage. En outre, ce décapant se dépose sur les électrodes ou les imprègne profondément. C'est le cas du carbone qui après quelques opérations peut être partiellement isolé.

Ces derniers inconvénients devront être présents à l'esprit dans la recherche d'une solution à un problème de brasage de pièces en acier, laiton, etc.

Parfois les inconvénients résultant du flux décapant pourront être évités en tout ou en partie, grâce à certains artifices, ou en modifiant la conception des pièces.

Le brasage par chauffage direct, procédé dans lequel le courant de chauffage ne doit pas traverser la brasure, est utilisé, pour autant que les pièces soient suffisamment résistantes pour être chauffées directement par Effet Joule et que leur forme s'adapte au brasage par résistance.

La figure 271 (page 279) représente une application de brasage par résistance par chauffage direct. Il s'agit de fixer une plaquette en acier doux sur un tube en acier doux.

Le tube est serré entre deux mâchoires normales en cuivre reliées électriquement au secondaire d'un transformateur. La plaquette est positionnée sur le tube à l'aide d'un dispositif mécanique. La brasure et le décapant sont insérés au préalable entre la plaquette et le tube. L'opérateur provoque le passage du courant dans le tube qui grâce à sa résistance ohmique élevée s'échauffe rapidement. En procédant par impulsions, la plaquette s'échauffe également par conduction et les surfaces à braser atteignent bientôt la température voulue. Dans ce cas, la présence de flux décapant ne contrarie pas du tout le passage du courant de chauffage et ne risque pas de détériorer les électrodes ou mâchoires de serrage.

Quand la nature des matériaux à braser, la forme des assemblages et les étendues à braser peuvent s'adapter au chauffage par résistance, on n'hésitera pas à appliquer cette méthode qui procure des avantages considérables :

— Possibilité de bien localiser le chauffage au joint à réaliser sans risque de détériorer les pièces se trouvant à proximité du joint (isolant par exemple).

— Grande capacité de production, grâce à la facilité de contrôle, du chauffage rapide et concentré, et à la facilité de positionnement.

— L'opérateur ne doit pas être un spécialiste.

— Faible consommation d'énergie électrique.

— Possibilité de braser en des endroits peu accessibles de pièces encombrantes, grâce à l'utilisation de pinces de brasage de formes diverses.

— L'effort de compression entre électrodes assure un positionnement aisé des pièces à braser, régularise le jeu entre pièces et permet un refroidissement sous pression.

QUELQUES APPLICATIONS DE BRASAGE PAR RÉSISTANCE RENCONTRÉES EN CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE.

La construction électrique fait une large utilisation des postes à braser par résistance fixes et mobiles pour réaliser les assemblages divers de méplats, fils, câbles, contacts en cuivre rencontrés dans la fabrication des transformateurs statiques, des moteurs, des alternateurs, des disjoncteurs, compteurs électriques, etc.

Dans beaucoup d'ateliers ces méthodes sont généralisées, car elles assurent des joints homogènes, de bonnes qualités électrique et mécanique, et ne risquant pas de perturber le fonctionnement par oxydation.

La figure 277 montre des connexions en méplats de cuivre brasées sur des bobines de transformateurs de postes à souder à l'arc. Ces connexions sont brasées sur le tour à bobiner, pendant l'opération de bobinage même, au fur et à mesure de la formation de la bobine en des endroits correspondant à des nombres de spires bien déterminés. Ce travail est réalisé à l'aide d'un poste mobile avec pince munie d'électrodes en carbone. On utilise de la brasure à l'argent sous forme de ruban.

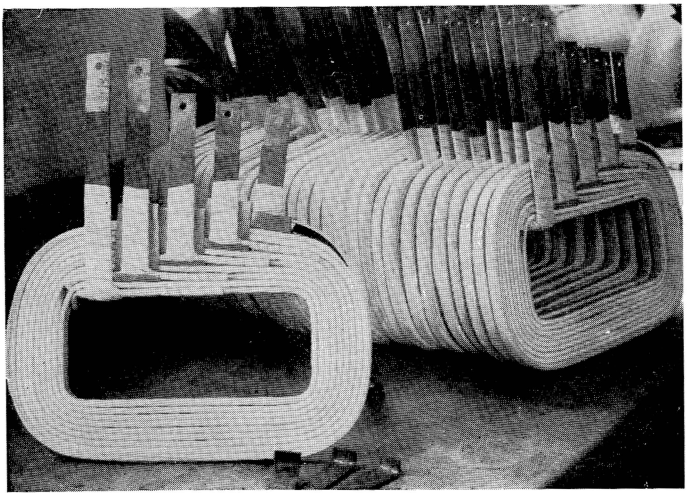


Fig. 277

Brasage de connexions en méplats de cuivre sur des bobines de transformateurs de postes à souder à l'arc.

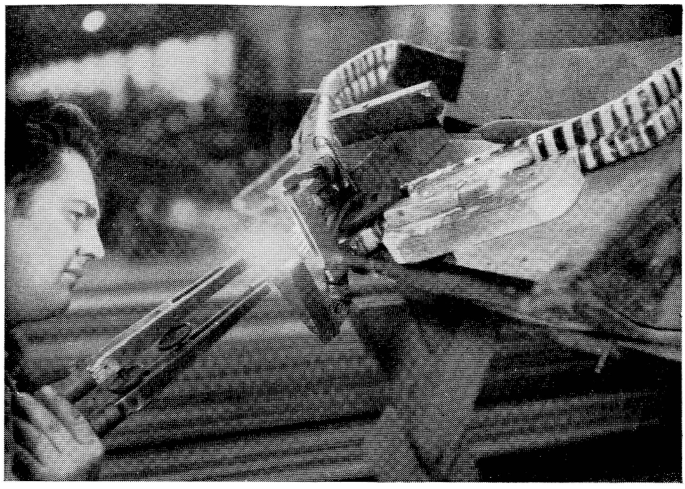


Fig. 278

Assemblage des sections de bobines de l'enroulement statorique d'un alternateur.

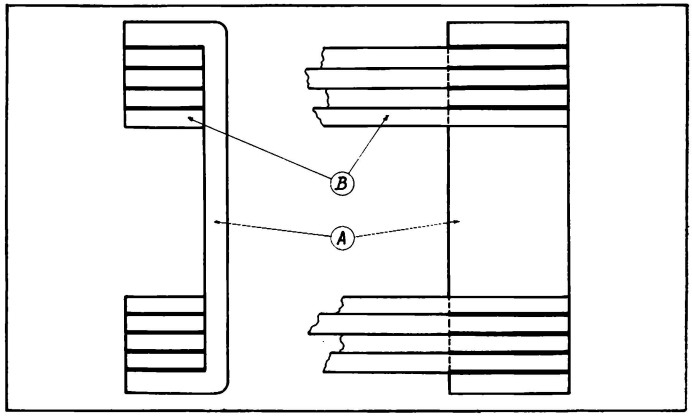


Fig. 279

Principe du raccordement des extrémités des spires de bobines statoriques.

A. Etriers en méplats de cuivre;
B. Extrémités des spires.

La figure 278 montre un stade de la fabrication des bobines de l'enroulement statorique d'un alternateur; l'assemblage des sections de bobinage par brasage par résistance. Les sections sont réalisées à partir de demi-spires qui, en nombre voulu, sont raccordées par brasage.

Les demi-spires isolées sont positionnées dans un gabarit en bois et leurs extrémités constituées par des méplats en cuivre de 10 × 2 (B. fig. 279), raccordées les unes aux autres par des étriers en méplat de cuivre 25 × 4 (A. fig. 279).

Certaines extrémités restent libres et sont connectées aux extrémités d'autres sections lors du montage pour former l'enroulement complet.

La figure 280 donne le principe de l'assemblage par pince de brasage équipée d'électrodes en carbone. Cinq épaisseurs sont brasées simultanément sur une surface de 250 mm² environ. La brasure à l'argent en plaquette est placée au préalable entre les différents méplats en cuivre.

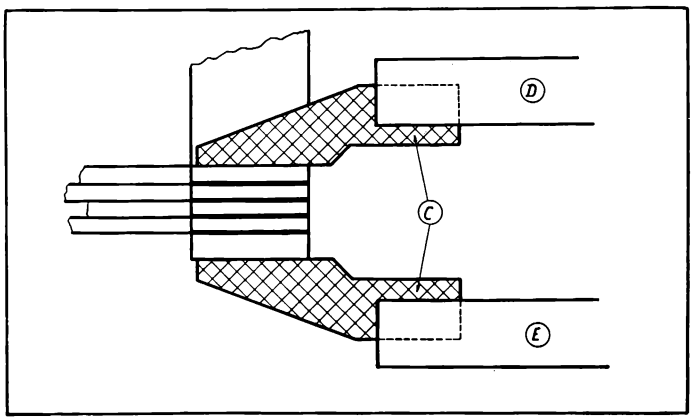


Fig. 280

Principe de l'assemblage par pince de brasage des étriers avec les extrémités de spires constituées par des méplats en cuivre.

C. Electrodes chauffantes en carbone.
D. Bras supérieur de la pince.
E. Bras inférieur de la pince.

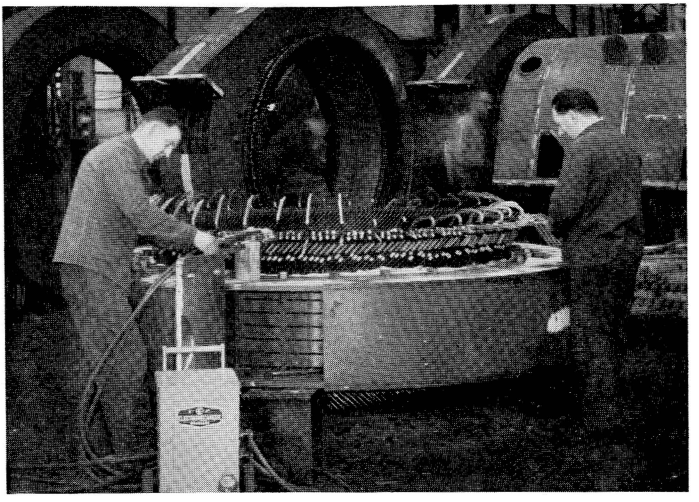


Fig. 281

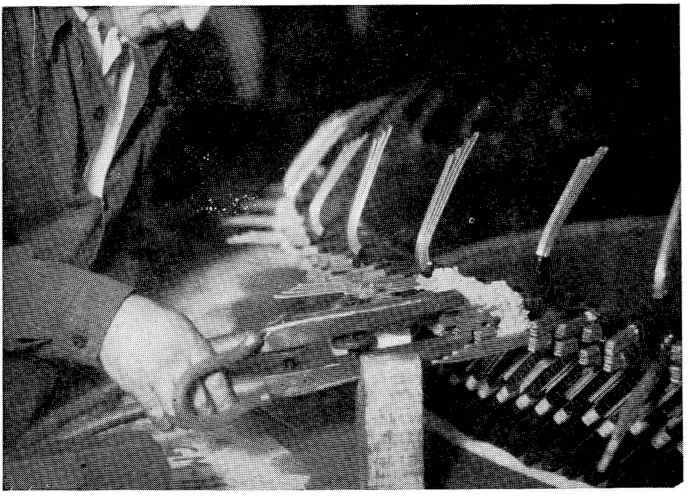


Fig. 282

Connexion par brasage de sections et bobines placées dans les encoches de la carcasse statorique d'un alternateur.

Les figures 281 et 282 montrent encore une autre application du brasage par résistance dans la construction d'un alternateur.

Comme on peut l'observer sur les photos, les sections de bobines sont placées dans les encoches prévues dans la carcasse statorique.

Pour achever l'enroulement induit, deux opérations sont effectuées :

1) Les sections sont mises en série par assemblage de leurs extrémités, pour former des bobines.

2) Ces bobines sont alors connectées entre elles suivant un schéma de bobinage bien déterminé.

Environ deux cents brasures à l'argent sont nécessaires pour réaliser ces deux dernières opérations. Chacun des assemblages, qui consiste à réunir 8 méplats en cuivre 8 × 3 superposés, est représenté en principe à la figure 283.

Un premier ouvrier place les plaquettes de brasure entre les extrémités de méplats, tandis que le deuxième ouvrier effectue l'opération de brasage à l'aide d'une pince avec électrodes en carbone.

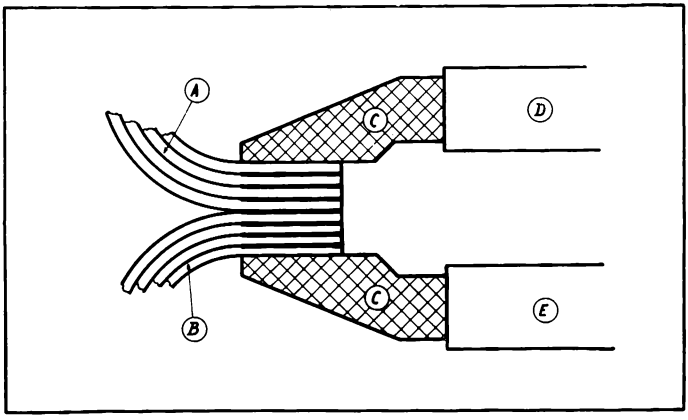


Fig. 283

Principe de l'assemblage par brasage à l'aide d'une pince munie d'électrodes en carbone, de 8 méplats en cuivre de 8 × 3.

Une autre application est le brasage des connexions entre bobines d'un moteur à courant continu.

Chacune des cosses, brasées au préalable sur les extrémités des bobines, est terminée par une partie plate. L'assemblage par brasage de deux cosses est réalisé comme indiqué à la figure 284, à l'aide d'une pince de brasage.

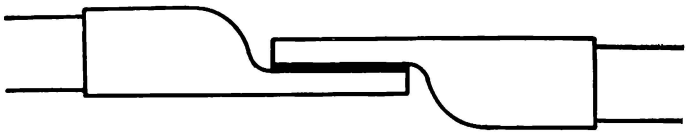


Fig. 284

Principe de l'assemblage par brasage de deux cosses : extrémités de bobines.

Le couplage par brasage des conducteurs du rotor d'un moteur électrique est représenté à la figure 285.

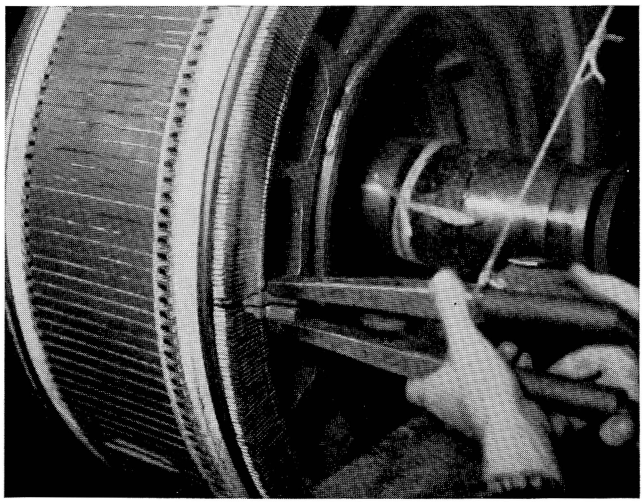


Fig. 285

Couplage par brasage des conducteurs du rotor d'un moteur électrique de 540 HP.

Quand il s'agit de réaliser par brasage des assemblages faisant partie de pièces de petites dimensions, le choix de l'utilisateur se porte alors sur des machines fixes.

Par exemple, le brasage de mises en argent sur contacts fixes et mobiles de disjoncteurs et contacteurs est réalisé sur presses à braser.

Pour ces applications, il est fait usage d'électrodes chauffantes à pastilles de molybdène.

Le contact, la plaquette de brasure et la mise en argent sont placés entre les électrodes, mis sous pression, puis parcourus par le courant de chauffage (fig. 286).

Les figures 287 et 288 montrent le brasage d'une mise en argent sur d'autres types de contacts.

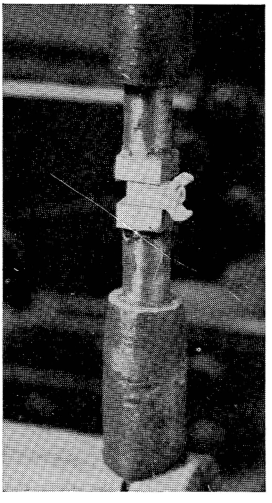


Fig. 286

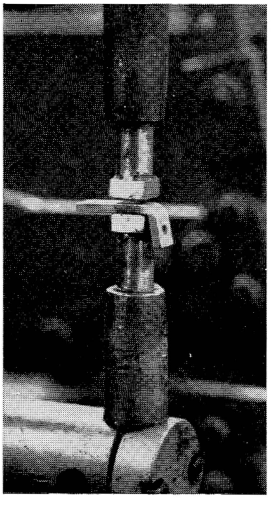


Fig. 287

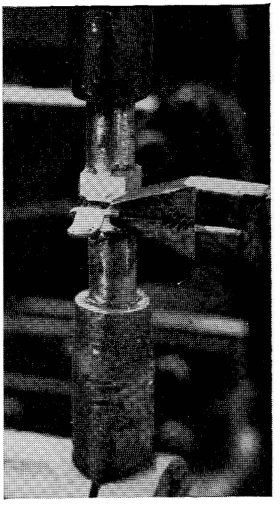


Fig. 288

Fig. 286 : Brasage de mises en argent sur contact fixe d'interrupteur auxiliaire pour contacteurs et disjoncteurs.

Fig. 287 : Brasage d'une mise en argent sur contact fixe de contacteur.

Fig. 288 : Brasage de mise en argent sur contact mobile d'interrupteur auxiliaire pour contacteurs et disjoncteurs.

CHAPITRE V

LE SOUDAGE AU GALET

DÉFINITION

Le soudage électrique au galet, encore appelé soudage électrique à la molette, est un procédé de soudage autogène, sans métal d'apport, dans lequel l'effet Joule d'un courant électrique traversant de façon continue ou périodique la résistance ohmique et la résistance de contact de deux tôles formant assemblage par recouvrement, est utilisé comme source calorifique pour porter une ligne continue de matière à la température de soudage.

Le procédé est en somme dérivé du soudage par point. Les électrodes sont remplacées par des galets de soudage ou molettes de soudage. Le passage du courant est localisé par ces galets, qui exercent sur les tôles à souder un effort de compression.

BUT

En général, le but du procédé est de réaliser à l'aide d'une ligne continue de soudure, l'assemblage de deux tôles dont l'épaisseur est relativement faible, de façon à obtenir une liaison étanche.

Ce procédé est indiqué pour le soudage de réservoirs et fûts de tout genre. Il remplace avantageusement le soudage au chalumeau.

PRINCIPE GÉNÉRAL

Au lieu d'être emprunté à une source extérieure, la chaleur nécessaire au soudage est engendrée dans les pièces mêmes, par effet Joule, à l'endroit du joint à réaliser.

Les tôles à souder sont posées à l'endroit du recouvrement sur le galet inférieur de la machine (fig. 289-A).

On provoque la descente du galet supérieur qui accoste les tôles sous une certaine pression (fig. 289-B).

Les surfaces extérieures des tôles sont en contact avec les galets sur une surface limitée qui dépend du diamètre des galets, de leur largeur et de l'effort exercé sur ceux-ci.

Les galets de soudage sont reliés aux bornes du secondaire d'un transformateur électrique dont le rôle est de fournir, dans le circuit de soudage, un courant électrique d'intensité élevée.

On imprime aux galets (fig. 289-C) un mouvement de rotation de sorte que les tôles à assembler se déplacent, entraînées par les galets.

On provoque alors (fig. 289-D) le passage du courant électrique à travers le circuit fermé par les galets et les tôles.

Le phénomène que l'on constate est similaire à celui du soudage par point. Comme le courant parcourt le circuit sans être interrompu après un temps déterminé et comme les pièces se déplacent sous les galets, on provoque l'échauffement d'une ligne.

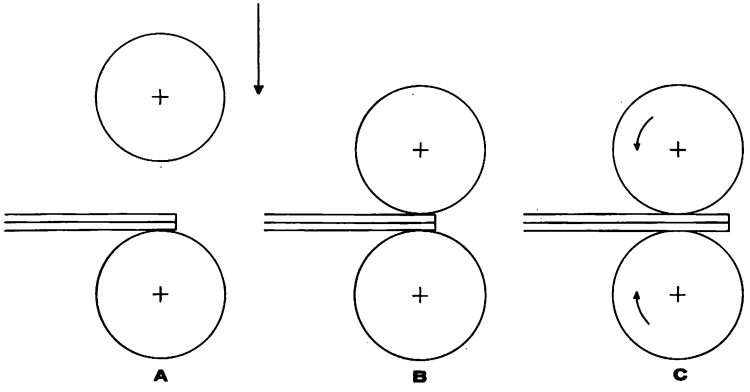


Fig. 289

Si les conditions électriques, de pression et de vitesse de l'opération sont bien choisies, on constatera une zone de fusion continue localisée entre les tôles et qui, après solidification, forme une soudure continue étanche.

Pour interrompre l'opération (fig. 289-E), il suffit d'interrompre le passage du courant et d'opérer le dégagement du galet supérieur.

Transversalement, la zone fondue est de section elliptique et peut être comparée à la section d'un point de soudure.

Le principe du soudage au galet a été décrit en supposant un passage ininterrompu du courant de soudage. En pratique, le cas n'est pas habituel et reste limité au soudage de faibles épaisseurs (< 0,8 mm par exemple) ou aux grandes vitesse de soudage (> 6 m/mn par exemple).

Pour les autres applications (fig. 290), le courant de soudage est interrompu périodiquement, dans le but de limiter la déformation des tôles sous l'accumulation locale excessive de chaleur; on réalise en même temps une économie de consommation électrique.

Il faut attirer l'attention sur le fait qu'en soudage à très grande vitesse on obtient une pulsation naturelle de l'énergie, développée grâce à la fréquence de 50 Hz (courant alternatif).

La fréquence des pulsations, la durée des temps de passage du courant et des temps de repos, s'obtiennent par un appareil électronique dont les particularités seront décrites plus loin.

Les facteurs importants de l'opération sont :

— les matériaux à souder, leurs caractéristiques et leurs dimensions (épaisseur, forme);

— l'intensité du courant de soudage;

— la fréquence des interruptions du courant;

— les temps de soudage et de repos;

— la vitesse de soudage;

— l'effort appliqué sur la ligne de soudure par les galets.

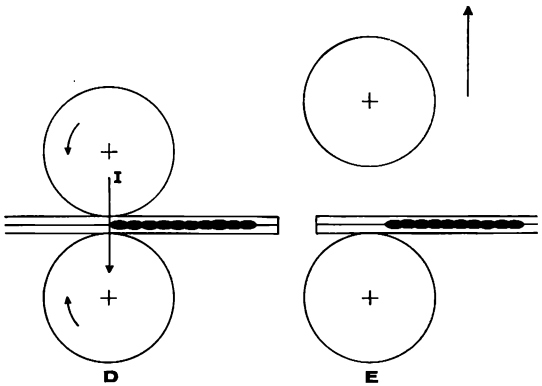


Fig. 289

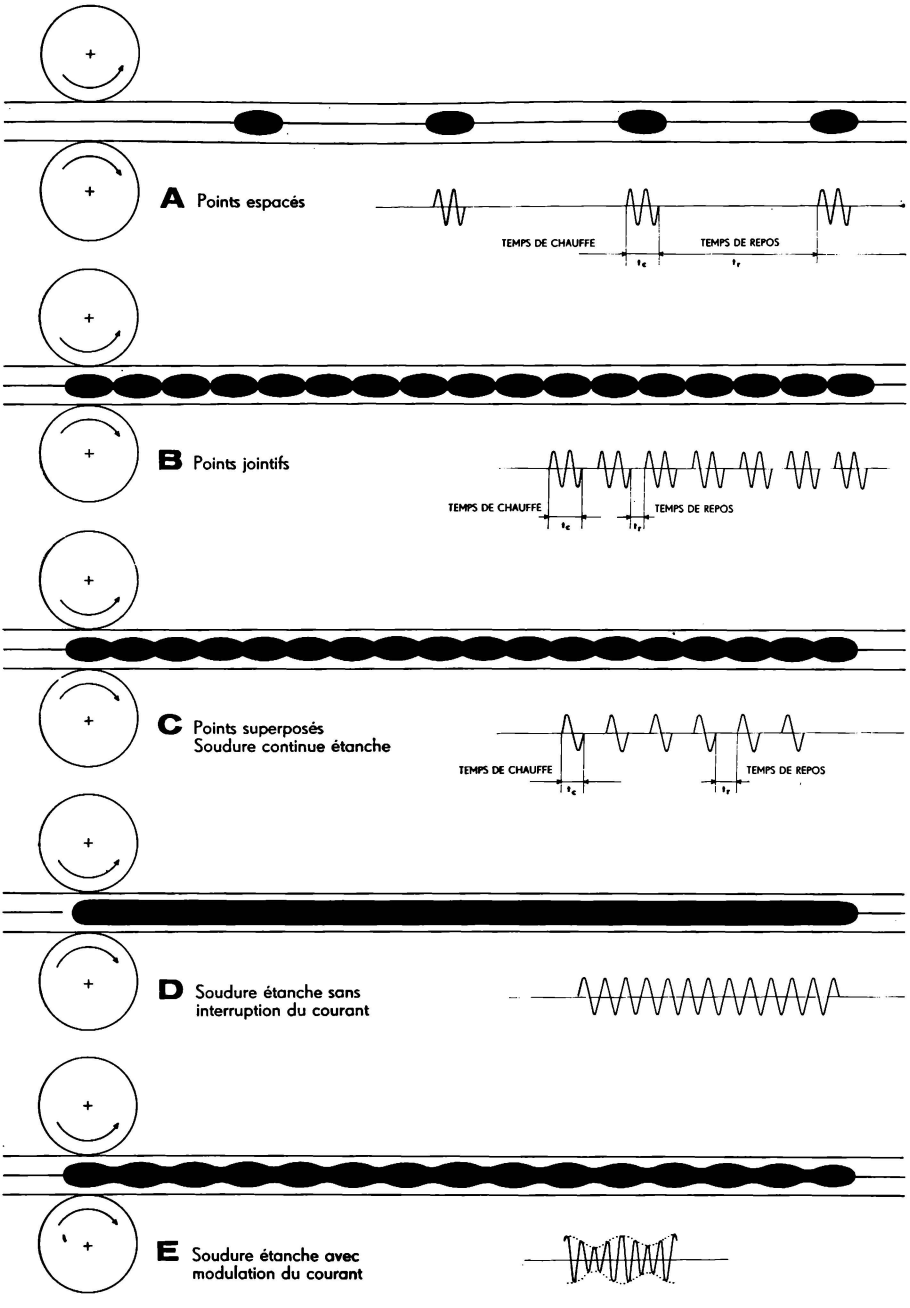

A Points espacés
TEMPS DE CHAUFFE
TEMPS DE REPOS
B Points jointifs
TEMPS DE CHAUFFE
TEMPS DE REPOS
C Points superposés
Soudure continue étanche
TEMPS DE CHAUFFE
TEMPS DE REPOS
D Soudure étanche sans
interruption du courant
E Soudure étanche avec
modulation du courant

Fig. 290

THÉORIE

PRINCIPES FONDAMENTAUX

La théorie du soudage au galet est comparable à celle du soudage par point, car en général une ligne de soudure étanche est constituée d'une série de points superposés (fig. 291).

Les considérations émises antérieurement pour le cas du soudage par point sont donc valables, mais nous aurons à considérer quelques particularités introduites par la nature même du procédé.

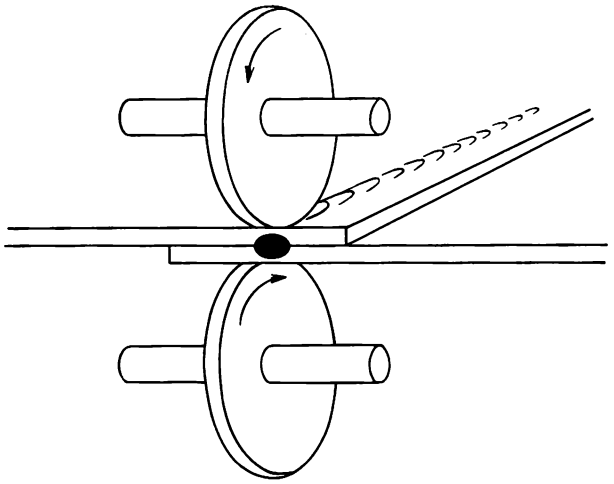


Fig. 291

Une soudure étanche est une succession de points superposés.

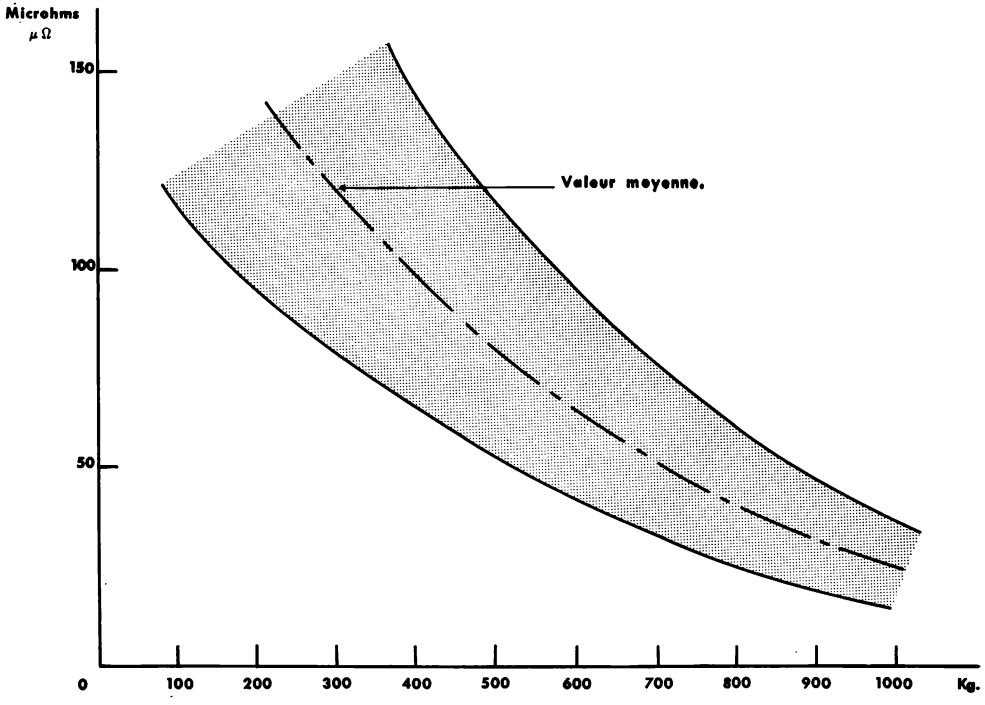


Fig. 292

Schéma de dispersion des mesures de résistance de contact en fonction de l'effort de compression.

LES RÉSISTANCES DE CONTACT

RÉSISTANCE DE CONTACT ENTRE TOLES.

Lorsque les galets de soudage sont à l'arrêt, la résistance de contact se détermine de façon similaire à celle employée en soudage par point.

On obtient un diagramme R contact-Effort, où la dispersion des résultats diminue au fur et à mesure que l'effort de compression est plus important, puisque la somme des petites surfaces de contact tend vers une limite représentée par l'écrasement parfait de toutes les aspérités de surface (fig. 292).

On a souligné le rôle important, quoique éphémère, de la résistance de contact en soudage par point.

En soudage au galet il faut tenir compte de deux influences particulières dues au procédé même de soudage :

a) la propagation de la chaleur précédant le galet de soudage qui modifie sensiblement l'état des tôles, et par conséquent, les valeurs des résistances de contact;

b) le shuntage, c'est-à-dire, le passage du courant par les points exécutés précédemment, phénomène connu en soudage par point, mais de singulière importance en soudage au galet vu le rapprochement des points.

La résistance de contact garde l'importance qu'elle présente en soudage par point, dans les cas suivants :

a) au début de chaque soudure au galet;

b) en soudage au galet par points espacés (fig. 290-A);

c) plus la vitesse de soudage est grande.

RÉSISTANCE DE CONTACT ENTRE GALETS ET TOLES.

La résistance de contact entre galets et tôles doit, tout comme en soudage par point, être la plus faible possible, pour éviter tout échauffement inutile en surface.

Ce qui n'est, toutefois, qu'une recommandation en soudage par point devient impératif en soudage au galet, afin d'éviter tout collage des tôles aux galets.

Nous en déduisons une règle pratique très importante, à savoir que toutes pièces, destinées à être assemblées par soudage au galet, doivent être exemptes d'oxydes, calamine, peinture, etc.

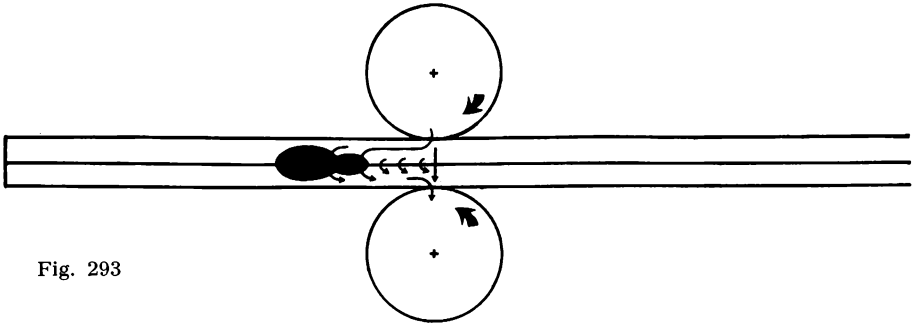


Fig. 293

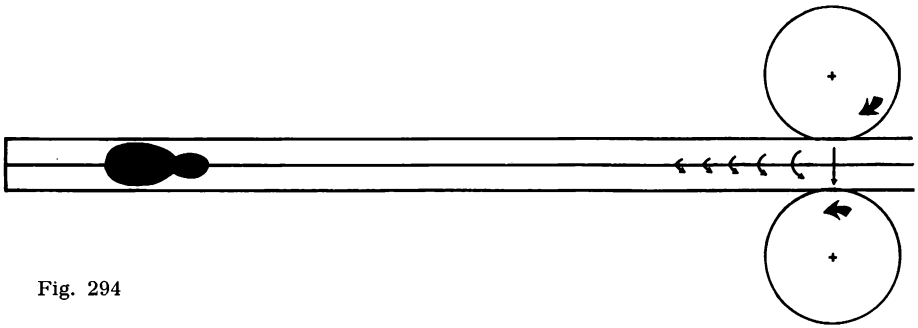


Fig. 294

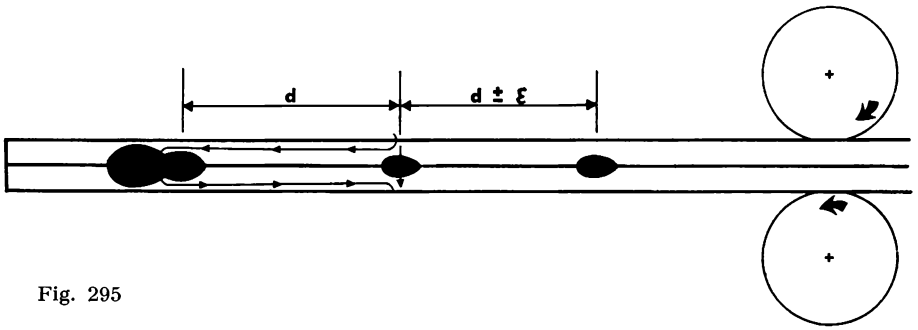


Fig. 295

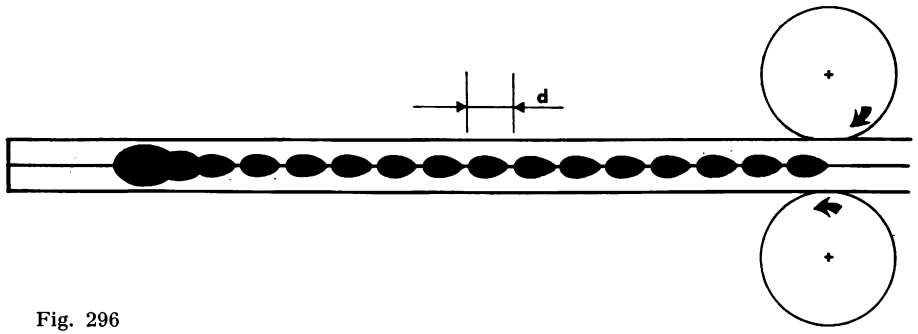


Fig. 296

PROCESSUS DE FORMATION D'UNE SOUDURE AU GALET

Dans l'étude qui suit, on n'examinera bien entendu, que le cas d'une soudure étanche, réalisée avec un courant interrompu périodiquement, c'est-à-dire une séquence comprenant des temps de chauffe et de repos successifs (fig. 290-B et 290-C).

Supposons, en premier lieu, les galets de soudage au repos. Etablissons, pour une épaisseur de tôles donnée, des réglages d'intensité, de temps de soudage et de pression, tels que l'on obtienne un point de soudure. Avec ce réglage et adoptant, par exemple, un temps de repos égal au temps de chauffe, on exécute une soudure au galet.

On obtient, généralement, l'aspect schématisé à la figure 293.

Il y a formation d'un premier point de soudure, grâce à l'existence de la résistance de contact.

Ce premier point est parfois suivi d'un second point, de dimensions beaucoup plus réduites, se superposant ou ne se superposant pas au premier point. Ensuite, on constate une brusque interruption de la zone soudée. Ce phénomène s'explique par l'effet de shuntage et la diminution de la résistance de contact entre tôles;

Si l'on constate, qu'ensuite, plus aucun point ne se forme (fig. 294), on doit en conclure qu'une diminution de résistance de contact empêche toute formation de point de soudure, car le shuntage ne peut être mis en cause, après le parcours d'une certaine distance.

Un tel cas se présentera lorsque la vitesse de soudage est lente et l'effort sur soudure important.

En effet, dans ce cas, la vitesse de propagation de la chaleur est nettement supérieure à la vitesse des galets et préchauffe en quelque sorte l'endroit à souder. Sous l'influence de l'effort, les aspérités s'écrasent et la résistance de contact disparaît, avant même que la fusion ait pu commencer.

Il faut, d'autre part, tenir compte du fait que, malgré qu'il n'y ait pas formation de points soudés, il existe un shuntage plus ou moins important dû au collage des pièces.

C'est surtout le cas des tôles plombées ou étamées où la chaleur dégagée, insuffisante pour fondre l'acier, peut amener le plomb ou l'étain à l'état plastique ou même provoquer une soudure à l'étain ou au plomb.

Parfois, on constate qu'à une certaine distance du premier point (fig. 295) un petit point se forme.

De petites plages soudées se retrouvent ainsi à des distances plus ou moins régulières.

On en déduit qu'à une distance d, l'influence du shuntage est devenue quasi nulle et que la résistance de contact a repris toute son importance relative.

Ce cas se présente lorsque la vitesse de soudage est élevée et l'effort sur soudure relativement peu important. Pour obtenir une soudure continue et combattre l'effet du shuntage, il faut donc augmenter l'intensité de soudage, de façon à ce que la distance d soit devenue la plus petite possible (fig. 296).

Pour obtenir alors une zone continue soudée et étanche, il faut que les points soudés se superposent, ce que l'on peut obtenir alors :

1) en diminuant la vitesse de soudage;

2) en augmentant le temps de chauffe par rapport au temps de repos.

On obtient alors une soudure telle que représentée par la macrographie (fig. 297).

Retenons de l'exposé du processus de formation d'une soudure au galet :

1) que c'est la fin d'un cordon et non le début qui doit être vérifié;

2) que la surintensité, que l'on doit adopter pour compenser la dérivation, provoque, en général, une projection de matière au début du cordon;

3) que pour éviter cet inconvénient et pour certaines applications, l'appareil électronique de contrôle comprendra un circuit d'établissement progressif du courant pendant les premières périodes d'un cordon.

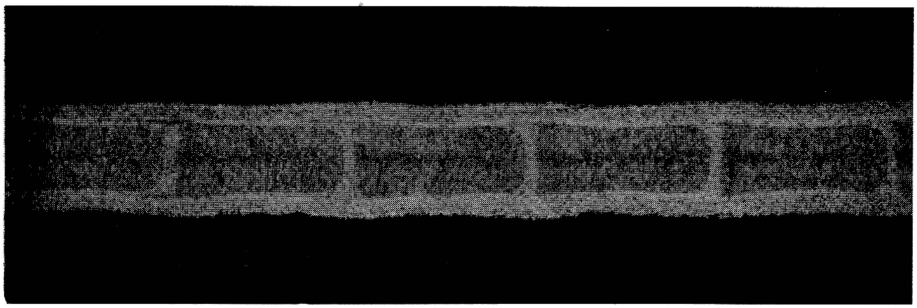


Fig. 297

ROLE DE L'EFFORT SUR SOUDURE DANS LA FORMATION DU CORDON DE SOUDURE

Le rôle de l'effort sur soudure dans la formation de la ligne de soudure est identique à celui défini antérieurement pour le soudage par point.

L'effort de compression exerce une influence directe sur les résistances de contact.

ASPECT MÉTALLURGIQUE DU SOUDAGE AU GALET

Ce qui a été dit antérieurement au sujet du soudage par point, peut être répété pour le soudage au galet. Le procédé qui consiste, comme nous le savons, à exécuter des points de soudure se superposant, modifie cependant quelques aspects.

Le rapprochement des points et l'intensité de courant beaucoup plus élevée qu'il faut employer pour les faire naître dans ces circonstances, provoquent une accumulation locale de chaleur beaucoup plus importante qu'en soudage par point.

En étudiant la figure 298 (comparer avec fig. 37, page 58), on constate, qu'ici, la zone C, ayant atteint la température critique de recristallisation, s'étend à la surface extérieure en contact avec les galets.

Quant à la zone D, elle est également beaucoup plus étendue et l'on remarque facilement en soudage de tôles d'acier, l'apparition des couleurs de revenu sur une largeur de 5 à 10 mm de part et d'autre de l'axe de soudure.

L'accumulation locale de chaleur et le fait que les galets restent peu de temps en contact avec un endroit déterminé, c'est-à-dire, qu'ils ne refroidissent guère l'endroit soudé, donnent lieu à une structure métallurgique plus grossière qu'en soudage par point.

Cet inconvénient n'a pas de conséquences puisqu'en soudage au galet on ne recherche pas la résistance mécanique du joint soudé mais son étanchéité.

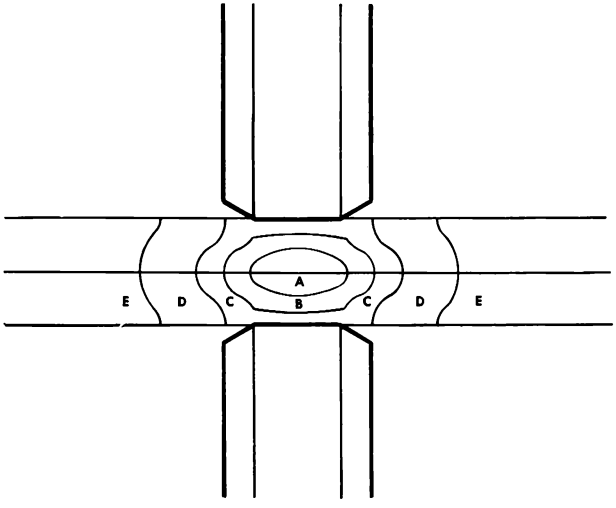


Fig. 298

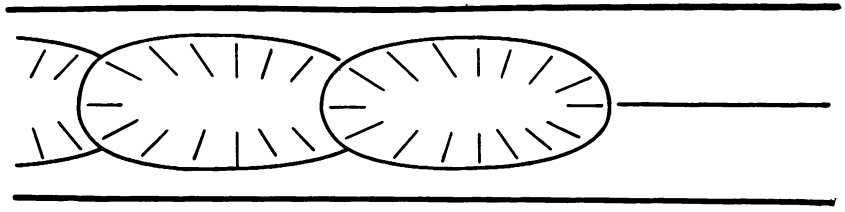


Fig. 299

Il faut encore mentionner qu'au point de vue métallurgique, on assiste, à chaque point de soudure, à une fusion partielle du point précédent.

Ce fait est démontré par la brusque ré-orientation des dendrites à l'endroit de la superposition (fig. 299).

Cette constatation nous permet, d'autre part, de nous faire une idée du temps nécessaire à la solidification d'un point, car il est inférieur au temps de repos entre deux impulsions de chauffe. En effet, si la matière d'un point n'était pas solidifiée au moment de la fusion du point suivant, on aurait l'aspect schématisé (fig. 300), qui est d'ailleurs plus ou moins celui d'une soudure effectuée sans interruption du courant de soudage et à faible vitesse.

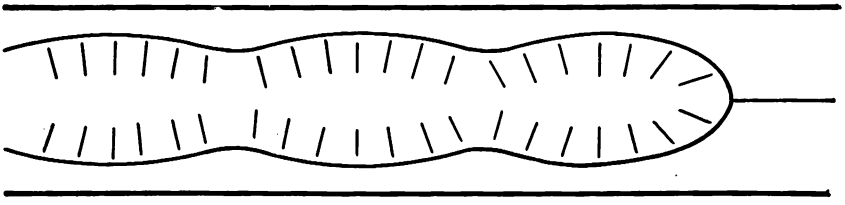


Fig. 300

ÉTUDE DES PARAMÈTRES

On ne dispose, jusqu'à présent, que de peu de données relatives à la détermination des paramètres du soudage au galet.

Ceci est dû à la complexité du mécanisme de formation du cordon de soudure et surtout à l'influence réciproque et mal déterminée des paramètres l'un sur l'autre.

L'étude ci-après expose la méthode expérimentale que les auteurs ont suivie pour déterminer les relations existant entre les divers paramètres du soudage au galet.

La connaissance de ces relations permet de déterminer par le calcul :

a) la puissance maximum nécessaire d'une machine en fonction des conditions de son utilisation en production;

b) les possibilités d'une machine existante.

Partant d'une relation simple entre l'épaisseur des tôles à souder et la largeur du cordon de soudure, on déduit par expérimentation et développement mathématique, une série de relations qui permettent de calculer les valeurs à donner aux divers paramètres.

Les essais ont été réalisés sur tôles d'acier doux laminées à froid, sur machines à souder à courant alternatif monophasé.

Les essais ont porté sur des tôles de 0,8 à 1,5 mm d'épaisseur (c'est-à-dire, les cas d'emplois les plus courants) avec des galets plats.

Les intensités indiquées sont des intensités mesurées galets en court-circuit.

Par largeur du cordon soudé, on entend la largeur réellement soudée, mesurée après déboutonnage.

L'allure des courbes données à titre d'exemple se vérifie pour d'autres valeurs que celles renseignées.

On rappelle pour mémoire que les paramètres sont :

— la largeur du cordon soudé;
— la largeur des galets de soudage;
— le temps de chauffe;
— le temps de repos;
— la fréquence des impulsions de chauffe;
— la vitesse de soudage;
— l'intensité du courant de soudage;
— l'effort sur soudure.

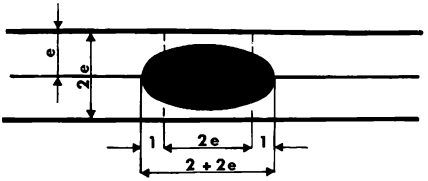


Fig. 301

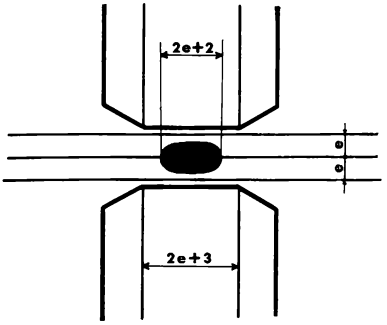


Fig. 302

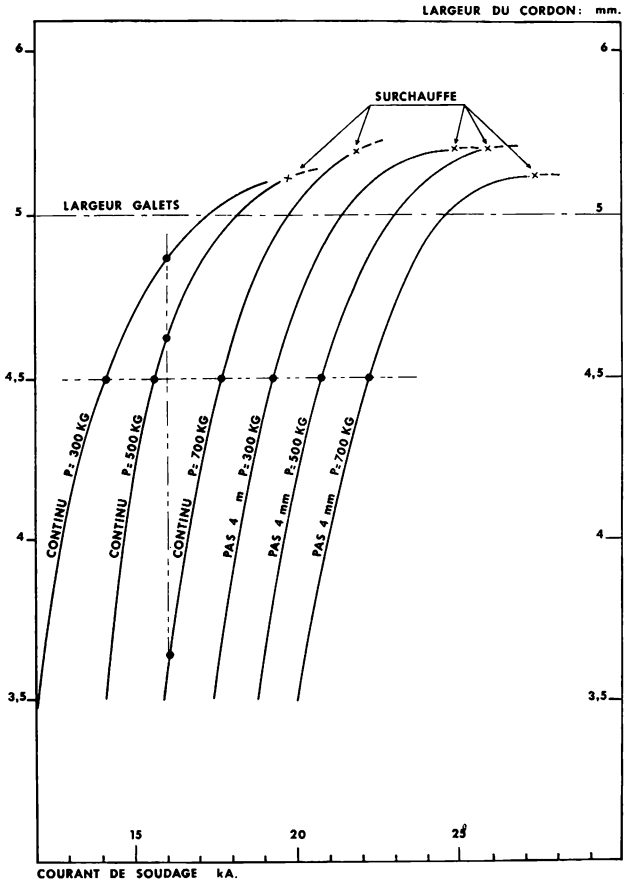


Fig. 303
Acier doux 2 × 1 mm - V : 2 m/mn - Largeur galets : 5 mm.

LARGEUR DU CORDON SOUDÉ

Le but du soudage au galet est la formation d'un cordon étanche.

On considère que la largeur moyenne du cordon est une mesure de l'efficacité avec laquelle le procédé est appliqué, ou encore, le résultat de l'opération.

La largeur idéale d'un cordon soudé en fonction de l'épaisseur des tôles à assembler est donnée par la formule suivante :

$$L = 2\,e + 2 \qquad \text{I.}$$

e = épaisseur en mm;

L = largeur en mm;

formule que l'on s'impose (fig. 301).

LARGEUR DES GALETS DE SOUDAGE

L'influence de la largeur des galets sur la largeur maximum que peut atteindre un cordon soudé, ressort nettement de l'examen des courbes de la figure 303 réalisées à vitesse constante et pour divers efforts sur soudure. On remarque :

1° que la largeur maximum du cordon soudé tend vers une limite légèrement supérieure à la largeur des galets. Cette constatation s'explique aisément par la dispersion maximum que peuvent atteindre les filets de courant;

2° qu'avant même que la largeur limite que semble indiquer l'allure des courbes soit atteinte, on constate des brûlures en surface entraînant la détérioration des galets;

3° que les constatations ci-dessus sont valables tant pour un courant ininterrompu que pour un courant interrompu périodiquement;

4° que la surchauffe est atteinte avec des valeurs d'intensité inférieures lorsque ce courant est ininterrompu.

On conclut que pour éviter les brûlures superficielles et la détérioration des galets, il faut que la largeur des galets reste supérieure à la largeur du cordon soudé. On détermine cette largeur par la formule suivante :

$$L \text{ galet} = L \text{ cordon} + 1 \text{ mm} \qquad (1)$$

$$= 2\,e + 2 + 1 \qquad (2)$$

$$L \text{ galet} = 2\,e + 3 \qquad \text{II.}$$

e = épaisseur en mm;

L = largeur en mm (fig. 302).

Tous les essais qui ont servi de base aux expériences qui suivent ont été réalisés avec des galets dont la largeur a été déterminée par la formule II et la largeur du cordon par la formule I.

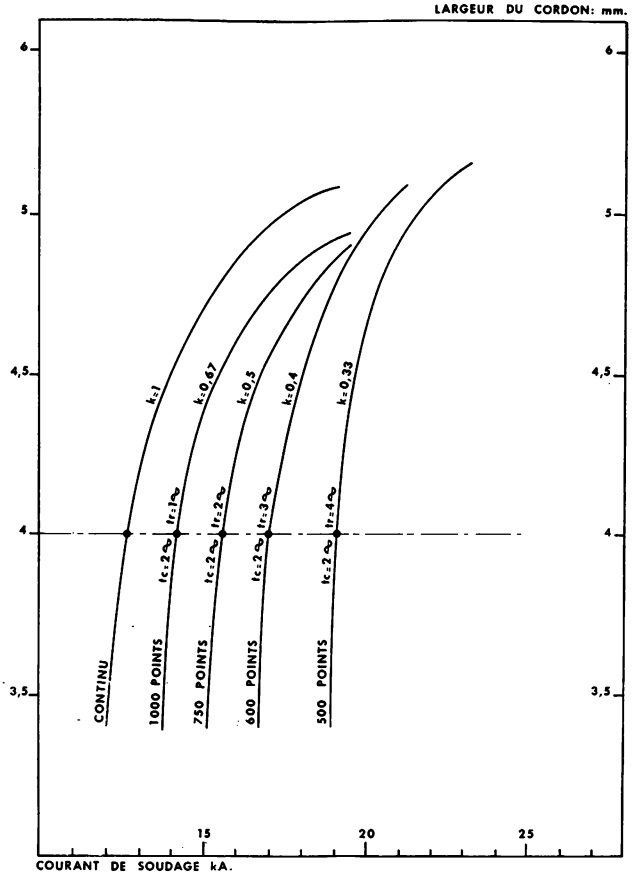


Fig. 304
Tôle d'acier 2 × 1 mm - V = 2 m/mn - P = 325 kg - Largeur des galets : 5 mm

$k = \frac{2}{2+0} = 1$	$Q = K \times 12{,}8^2 \times 1 = 163\ K$ (continu)
$k = \frac{2}{2+1} = 0{,}67$	$Q = K \times 14{,}2^2 \times 0{,}67 = 134\ K$ (interrompu)
$k = \frac{2}{2+2} = 0{,}5$	$Q = K \times 15{,}5^2 \times 0{,}5 = 122\ K$ (interrompu)
$k = \frac{2}{2+3} = 0{,}4$	$Q = K \times 17^2 \times 0{,}4 = 116\ K$ (interrompu)
$k = \frac{2}{2+4} = 0{,}33$	$Q = K \times 19^2 \times 0{,}33 = 120\ K$ (interrompu)

FRÉQUENCE DES IMPULSIONS

La fréquence des impulsions correspond à un nombre de points soudés par unité de temps.

On a coutume de l'exprimer en points par minute et, dans ce cas, ce nombre est donné par la relation :

$$n = \frac{3\,000}{t_c + t_r} \qquad \text{III.}$$

3 000 = nombre de périodes par minute à la fréquence de 50 Hz;

t_c = temps de chauffe en périodes;

t_r = temps de repos en périodes.

TEMPS DE CHAUFFE - TEMPS DE REPOS

La figure 304 présente une série de courbes établies en fonction de la largeur du cordon L et du courant de soudage I obtenues en faisant varier le temps de repos, c'est-à-dire le rapport :

$$k = \frac{t_c}{t_c + t_r}. \qquad (3)$$

On peut exprimer l'énergie requise pour l'obtention d'un cordon de largeur idéale et pour une longueur de cordon soudé quelconque, par :

$$Q = K \,.\, I^2 \,.\, k \,.\, t.$$

On constate dans le cas précis de l'exemple (cordon = 4 mm) que pour une même vitesse et $t = 1$ et pour diverses valeurs de k, l'on obtient les valeurs du tableau du bas de la page 312, c'est-à-dire que le rendement thermique de l'opération s'améliore au fur et à mesure que le temps de repos est plus long.

Pour un temps $t_c = t_r$ le rendement optimum est à peu près atteint. Comme d'autre part, on ne peut augmenter indéfiniment le temps de repos sous peine de ne plus avoir une soudure étanche, il est pratique d'adopter $t_c = t_r$. Ces valeurs sont d'ailleurs les plus couramment employées dans la pratique.

PAS DE SOUDURE

Le pas de soudure, c'est-à-dire la distance entre deux points, est donnée par la relation :

$$p = \frac{v \times 1\,000}{n} \qquad (4)$$

p = pas en mm;

v = vitesse en m/mn;

n = nombre de points par minute.

Connaissant la valeur de n (voir III) on déduit :

$$p = \frac{v \times 1\,000 \times (t_c + t_r)}{3\,000} \qquad (5)$$

$$p = \frac{v \times (t_c + t_r)}{3} \qquad \text{IV.}$$

Puisque l'on a constaté que le rendement maximum s'obtenait pour (ou à partir de $t_c = t_r$) le pas d'une soudure exécutée avec le rendement thermique maximum s'écrit :

$$p = \frac{v \times 2\,t_c}{3} \qquad (6)$$

$$\boxed{p = 0{,}66\ v.t_c} \qquad \text{V.}$$

VITESSE - TEMPS DE CHAUFFE

On considère un diagramme expérimental (fig. 305) courant-vitesse de soudage, établi pour une épaisseur de tôles constante.

La largeur des galets et la largeur du cordon soudé sont déterminées par les relations I et II.

Le pas de soudure est variable d'une courbe à l'autre, mais obtenu en toutes circonstances pour $t_c = t_r$ (rendement thermique maximum).

On remarque immédiatement que pour une vitesse donnée l'intensité nécessaire pour la réalisation du cordon diminue au fur et à mesure que le pas devient grand.

Cette constatation s'explique par le phénomène de la dérivation du courant.

En d'autres termes, on constate que même lorsque $t_c = t_r$ il est possible d'améliorer encore le rendement thermique de l'opération de soudage en choisissant un plus grand pas. Toutefois pour obtenir un cordon de soudure étanche une valeur limite du pas s'impose.

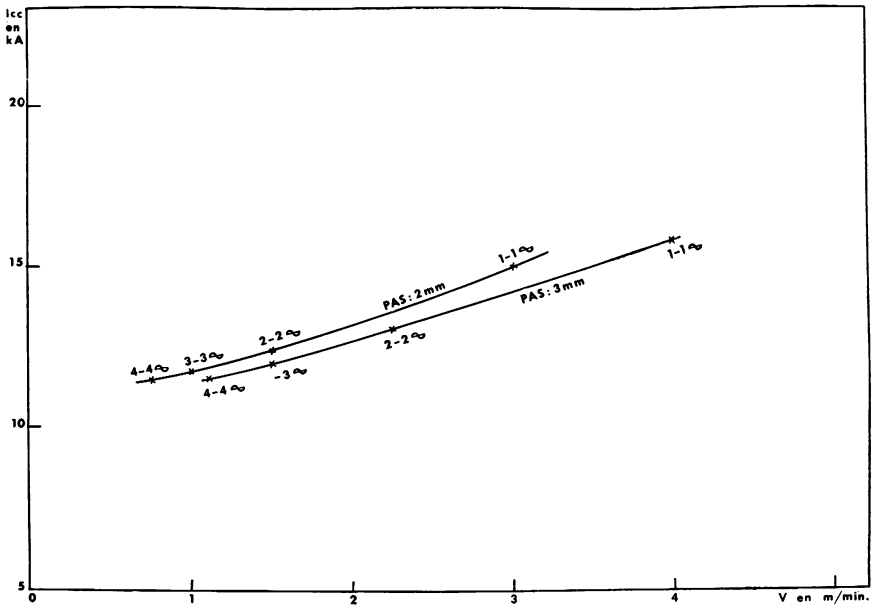


Fig. 305

Acier doux 2 × 0,8 mm - Largeur cordon : 3,5 mm.

Cette valeur maximum peut s'exprimer en fonction de la largeur du cordon par la formule suivante qui tient compte d'un recouvrement de deux points consécutifs égal à 15 % de la largeur du cordon soudé :

$$p_{max} = 0{,}85\ (2 + 2\ e) \qquad (7)$$

$$= 1{,}7\ e + 1{,}7 \qquad (8)$$

Connaissant l'expression du pas (V) on peut alors poser l'égalité :

$$0{,}66\ v\,.\,t_c = 1{,}7\ e + 1{,}7 \qquad (9)$$

et on en tire :

$$\boxed{v \times t_c = 2{,}5\ e + 2{,}5} \qquad \text{VI.}$$

Pour une épaisseur de tôle donnée, il en résulte que :

$$v \times t_c = \text{Cte} \qquad (10)$$

soit une relation entre deux paramètres permettant d'obtenir le soudage avec un rendement thermique maximum, c'est-à-dire avec déformation minimum des pièces à souder.

COURANT DE SOUDAGE - VITESSE DE SOUDAGE

Supposons la section d'un cordon étanche rectangulaire, la largeur étant de (2 + 2e) et la hauteur égale à 0,8 × 2e (c'est-à-dire une pénétration de 80 %).

La quantité de chaleur théoriquement requise pour fondre un tel cordon de longueur $v \cdot t$ s'écrit :

$$Q = (2 + 2e)\ (0{,}8 \times 2e) \times 1\,000 \times v \times t \times (c_1 \times t^{o} + c_2) \quad (11)$$

e = épaisseur en mm;
v = vitesse en m/mn;
t = temps en minutes;
c_1 = chaleur spécifique par mm³;
c_2 = chaleur latente par mm³;
t^{o} = température de fusion.

ou encore :

$$Q = K \times (e + e^2) \times v \times t. \quad (12)$$

Pendant un temps t, l'énergie électrique développée s'exprime par :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \times k \quad (13)$$

t = en minutes;
I = en ampères.

$$k = \frac{t_c}{t_c + t_r} = 0{,}5 \text{ pour rendement maximum}$$

W = en watt-minute;

et son équivalent calorifique s'écrit :

$$Q = K_1 \cdot I^2 \cdot t \quad (14)$$

On pose :

$$K \cdot (e + e^2)\ v \cdot t = K_1 \cdot I^2 \cdot t \quad (15)$$

d'où :

$$K \cdot (e + e^2)\ v = K_1 \cdot I^2 \quad (16)$$

d'où :

$$\frac{I^2}{v} = \frac{K}{K_1}(e + e^2) = K_2 (e + e^2) \quad (17)$$

c'est-à-dire que pour une épaisseur de tôle donnée :

$$\frac{I^2}{v} = \text{Cte} \quad (18)$$

ce qui est logique puisque ce quotient représente une quantité de chaleur par unité de longueur.

En réalité, il faut tenir compte des pertes.

La quantité de chaleur requise pour souder une certaine longueur s'exprime par :

$$Q \text{ nécessaire} = Q \text{ utile} + Q \text{ pertes}. \quad (19)$$

Nous connaissons l'expression de Q utile (voir 12).

Quant aux pertes, on distingue :

a) l'absorption de chaleur par les galets
laquelle est proportionnelle à la largeur de ceux-ci et à la durée de l'opération.

On peut les exprimer par la relation :

$$Qp_1 = K_3\,(2e + 3)\,.\,t \qquad (20)$$

$$= K_4\,(e + 1{,}5)\,.\,t. \qquad (21)$$

b) les pertes dans les tôles.

Les pertes dans les tôles sont proportionnelles à la quantité de chaleur utile déterminée par la formule (12).

Elles sont d'autant plus importantes que l'épaisseur est grande.

Elles sont également fonction de la vitesse à laquelle le cordon est réalisé, ce qui est moins évident et que l'on met en lumière ci-après.

On constate (fig. 306) en soudage que l'apparition des couleurs de revenu forme un sillage d'autant plus aigu que la vitesse est grande. On conçoit aisément que dans le cas *b*) les pertes soient plus importantes que dans le cas *a*) puisque la matière environnante à basse température est plus importante.

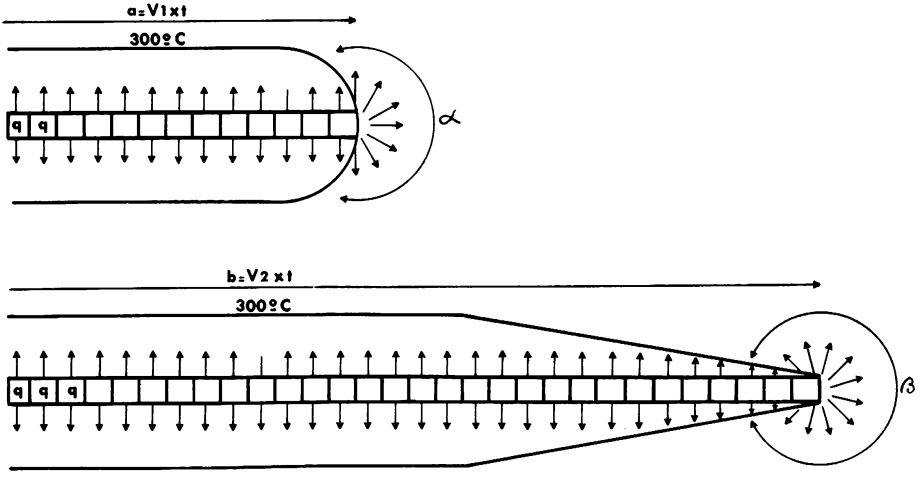


Fig. 306

Il est naturellement malaisé de trouver l'expression exacte des pertes dans les tôles mais on peut estimer, suite aux observations ci-dessus, qu'elles s'écrivent :

$$Qp_2 = [K\,(e + e^2)\,v\,.\,t] \times (K_5\,.\,e) \times (K_6\,.\,v^x) \tag{22}$$

$$Qp_2 = K_7\,.\,e\,.\,(e + e^2)\,.\,v^{(1+x)}\,.\,t. \tag{23}$$

Ceci étant admis, on peut écrire en reprenant les expressions (19), (21) et (23) :

Q nécessaire =

$$K\,(e + e^2)\,.\,v\,.\,t + K_4\,(e + 1{,}5)\,.\,t + K_7\,.\,e\,(e + e^2)\,.\,v^{(1+x)}\,.\,t. \tag{24}$$

Cette chaleur nécessaire est fournie par le courant de soudage durant un temps t et l'équivalent calorifique de l'énergie électrique s'écrit :

$$Q \text{ nécessaire} = K_8\,.\,I^2\,.\,t. \tag{25}$$

d'où, en reprenant (24) et (25) :

$$K_8\,I^2\,t = K\,(e + e^2)\,v\,.\,t + K_4\,(e + 1{,}5)\,.\,t + K_7\,.\,e\,(e + e^2)\,v^{(1+x)}\,.\,t \tag{26}$$

d'où :

$$K_8\,I^2 = K\,(e + e^2)\,.\,v + K_4\,.\,(e + 1{,}5) + K_7\,.\,e\,(e + e^2)\,v^{(1+x)} \tag{27}$$

$$I^2 = K_9\,(e + 1{,}5) + K_{10}\,(e + e^2)\,v + K_{11}\,.\,e\,(e + e^2)\,v^{(1+x)} \tag{28}$$

Examinons maintenant les courbes I - v relevées expérimentalement (fig. 305).

Vu l'allure assez plate des courbes, on peut admettre que :

$$I = C_1 + C_2\,v \tag{29}$$

c'est-à-dire une relation linéaire.

Dans cette hypothèse :

$$I^2 = C_1^2 + 2\,.\,C_1\,.\,C_2\,.\,v + C_2^2\,.\,v^2. \tag{30}$$

On constate que cette équation peut être comparée à (28) si l'on prend $x = 1$.

On écrit alors l'identité :

$$C_1^2 + 2\,.\,C_1\,.\,C_2 v + C_2^2\,v^2 = K_9\,(e + 1{,}5) + K_{10}\,(e + e^2)\,v + K_{11}\,e\,(e + e^2)\,.\,v^2 \tag{31}$$

et l'on en déduit les valeurs de :

$$C_1 = \sqrt{K_9\,(e + 1{,}5)} \tag{32}$$

$$C_2 = \sqrt{e\,(e + e^2)\,K_{11}}\,. \tag{33}$$

Celles-ci se vérifient et vérifient les hypothèses antérieures par l'expression de leur produit :

$$2\,C_1\,C_2 = 2 \times \sqrt{K_9\,(e + 1{,}5)} \times \sqrt{e\,(e + e^2)\,K_{11}} \tag{34}$$

$$C_1\,C_2 = \sqrt{K_9\,K_{11}\,.\,e^2\,.\,(e + 1{,}5)\,(e + 1)} \tag{35}$$

que l'on peut à peu de chose près écrire :

$$C_1\,C_2 = \pm\,e\,(e + 1)\,\sqrt{K_9\,.\,K_{11}} = (e + e^2)\ \sqrt{K_9\,.\,K_{11}} \tag{36}$$

correspondant au coefficient $K_{10}\,.\,e\,(e + 1)$ du second terme de l'identité (31).

On en déduit que l'on peut adopter comme expression du courant en fonction de la vitesse :

$$I = K_{12}\sqrt{e + 1} + K_{13}\,.\,e\ \sqrt{e + 1}\,.\,v. \qquad (37)$$

Pour l'acier doux, on adopte, suite à plusieurs essais, les valeurs suivantes :

$$K_{12} = 7\,500$$
$$K_{13} = 1\,600$$

de sorte que :

$$I = 7\,500\ \sqrt{e + 1} + 1\,600\ e\ \sqrt{e + 1}\,.\,v \qquad \text{VII.}$$

v = vitesse en m/mn;
e = épaisseur en mm;
I = courant en ampères.

Relations I — v pour différentes épaisseurs de tôles d'acier doux.

Se basant sur la formule VII on en déduit les formules pratiques		
Epaisseur		
0,5	$I = 9\,250 + 975\ v$	(38)
0,8	$I = 10\,000 + 1\,720\ v$	(39)
1	$I = 10\,600 + 2\,260\ v$	(40)
1,25	$I = 11\,225 + 3\,000\ v$	(41)
1,50	$I = 11\,850 + 3\,800\ v$	(42)
1,75	$I = 12\,450 + 4\,650\ v$	(43)
2	$I = 12\,850 + 5\,550\ v$	(44)
2,50	$I = 14\,000 + 7\,500\ v$	(45)
3	$I = 15\,000 + 9\,600\ v$	(46)

Ces formules sont reprises sous forme de diagramme (fig. 307).

Note. — Partant de la formule $I\sqrt{t} = \Delta \times S$ utilisée en soudage par point on peut, en considérant l'opération de soudage à la molette comme étant isothermique, arriver à l'expression suivante de l'intensité en fonction de la vitesse :

$$I = 1{,}8\ \sqrt{\frac{t_c + t_r}{t_c}}\,.\,(e + 1)^{3/2}\,.\,\sqrt{v}\,.\,\Delta\left[1 + \frac{1{,}2\ e^2}{(e + 1)^2 - 1{,}8\ \frac{\sqrt[4]{e + 1}}{v}}\right]$$

dans laquelle $\Delta = 1\,000$ A. pér.$^{-½}$/mm^2.

Cette équation, établie par J. Vieweger, ingénieur à la Sté Electromécanique (Bruxelles), donne des valeurs sensiblement égales à celle de la formule VII.

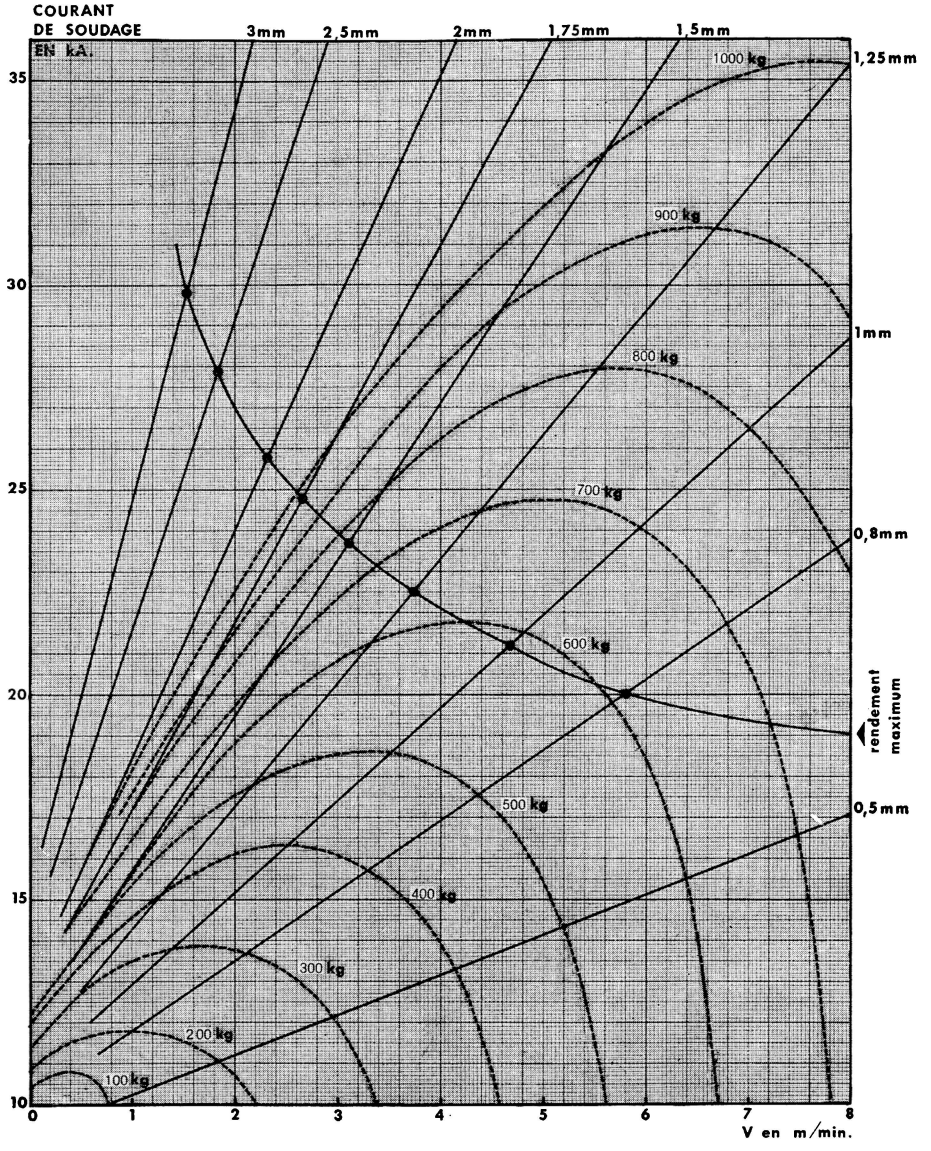


Fig. 307

Soudage au galet de l'acier doux.

VITESSE IDÉALE DE SOUDAGE

Il reste encore à déterminer quelle est la vitesse idéale, c'est-à-dire la vitesse donnant un rendement maximum. Le rendement maximum est atteint pour :

$$\frac{I^2 . t}{v . t} = \frac{I^2}{v} \text{ minimum}$$

puisque cette expression représente une quantité de chaleur par unité de longueur de cordon.

Nous avions posé (29) :

$$I = C_1 + C_2 v$$

d'où :

$$I^2 = C_1^2 + 2 C_1 C_2 v + C_2^2 v^2$$

et :

$$\frac{I^2}{v} = y = \frac{C_1^2}{v} + 2 C_1 C_2 + C_2^2 v. \qquad (47)$$

La fonction est minimum pour :

$$\frac{dy}{dv} = 0$$

soit :

$$\frac{dy}{dv} = -\frac{C_1^2}{v^2} + C_2^2 = 0 \qquad (48)$$

et d'où nous déduisons :

$$\frac{C_1^2}{v^2} = C_2^2 \qquad (49)$$

$$v^2 = \frac{C_1^2}{C_2^2} \qquad (50)$$

$$v = \frac{C_1}{C_2} \qquad (51)$$

qui représente la vitesse idéale de soudage.

L'intensité qui correspond à cette vitesse se calcule :

$$I \text{ idéal} = C_1 + C_2 v$$

$$I \text{ idéal} = C_1 + \left(C_2 \times \frac{C_1}{C_2} \right) \qquad (52)$$

$$I \text{ idéal} = 2 C_1 \qquad \text{VIII}$$

Reprenant les relations de (38) à (46) nous en déduisons par rapport aux épaisseurs à souder, les vitesses idéales et leur intensité correspondante.

Epaisseur	V idéal	I idéal	
0,5	9,5 m/mn	18 500 A	(53)
0,8	5,8 m/mn	20 000 A	(54)
1	4,70 m/mn	21 200 A	(55)
1,25	3,75 m/mn	22 450 A	(56)
1,50	3,10 m/mn	23 700 A	(57)
1,75	2,65 m/mn	25 000 A	(58)
2	2,30 m/mn	25 700 A	(59)
2,5	1,85 m/mn	28 000 A	(60)
3	1,55 m/mn	30 000 A	(61)

Ces résultats sont renseignés au diagramme (fig. 307).

Note :

1) Les vitesses idéales ci-dessus ne sont pas valables pour les épaisseurs 0,5 et 0,8.

En effet, pour ces cas n étant égal à 1 500 ($t_c = t_r = 1$) et le pas maximum respectivement à 2,5 et 3 mm, les soudures ne sont donc pas étanches.

2) Pour des vitesses supérieures ou inférieures aux vitesses idéales, la quantité de chaleur développée par millimètre courant est plus grande et le rendement inférieur.

3) S'écarter de ces vitesses ne signifie cependant pas que l'on obtient des soudures de qualité inférieure. En fait, et la plupart du temps, la forme des pièces à souder limite la vitesse de soudage à une valeur nettement inférieure à la vitesse idéale.

EFFORT SUR SOUDURE

Des essais systématiques ont montré qu'en développant par unité de longueur la quantité de chaleur donnée par les courants calculés selon la formule VII, il fallait appliquer un effort sur soudure croissant avec la vitesse, sous peine de constater des brûlures superficielles.

Les courbes relevées à la figure 308 ont été établies avec passage ininterrompu du courant sur tôles d'acier doux en s'imposant d'appliquer un effort tel que l'empreinte laissée par le galet ne présente jamais le bombé caractéristique des soudures réalisées à grande vitesse sous faible effort (fig. 309).

Les courbes de l'effort minimum à appliquer pour atteindre ce but (fig. 308) ont la forme

$$F = F_0 + F_1 . v. \qquad \text{IX}$$

Dans cette expression F_0 représente les valeurs obtenues en prolongeant les courbes vers leur origine, c'est-à-dire pour une vitesse de soudage $v = 0$, ce qui constitue un cas limite puisqu'à ce moment on ne peut plus parler de soudage au galet.

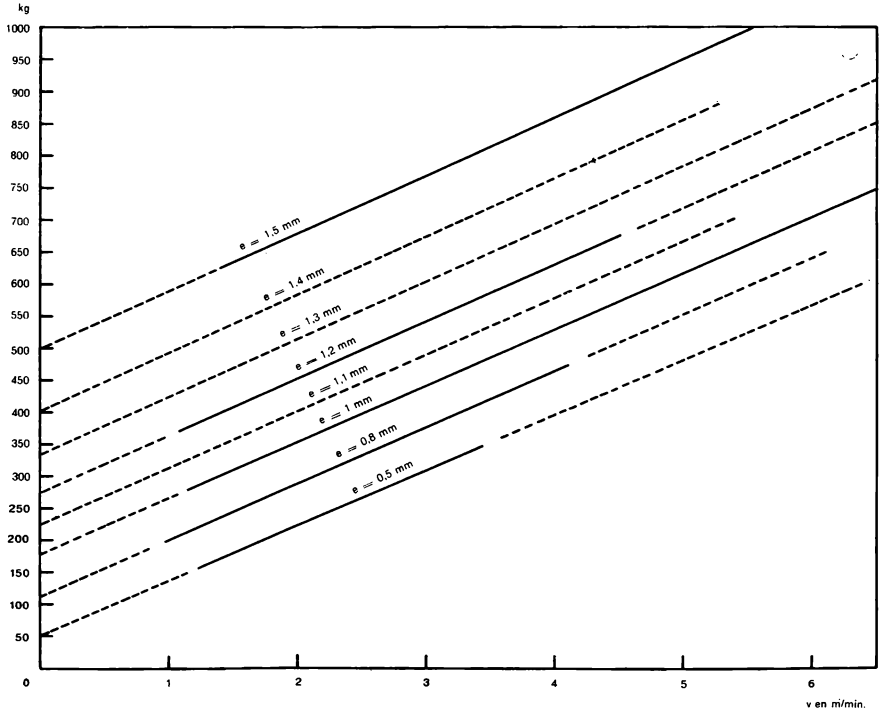


Fig. 308

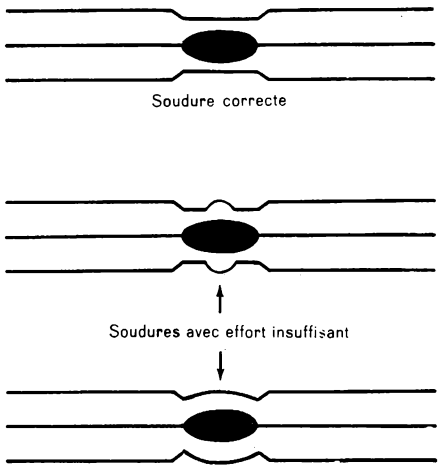


Fig. 309

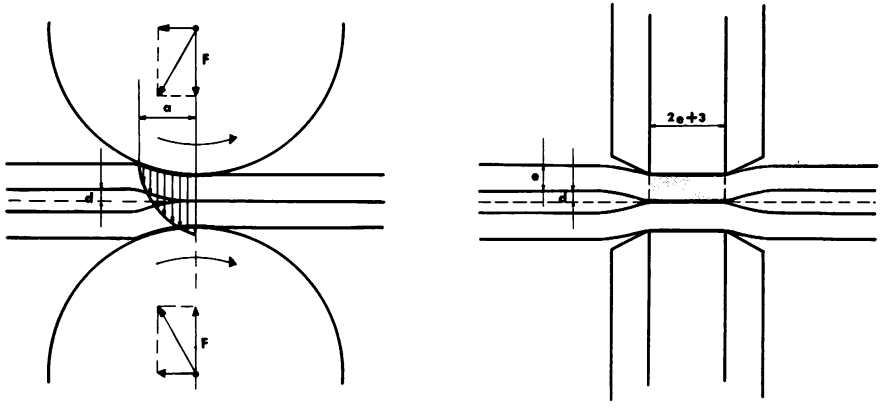


Fig. 310

On peut considérer que F_0 représente l'effort minimum pour l'accostage des tôles.

La figure 310 schématise l'accostage et l'on en déduit que pour provoquer une déformation d, l'effort F_0 doit être en rapport avec le moment d'inertie de la section hachurée, soit :

$$F_0 = f\,[(2\,e + 3)\,e^3]$$

mais l'expression est certainement plus complexe encore car il faut tenir compte de la rigidité des tôles dans le sens perpendiculaire à l'axe de la soudure, et d'autres facteurs encore.

On peut dire toutefois que F_0 est une fonction de l'épaisseur e, ainsi que le montre d'ailleurs la figure 311 établie à partir des courbes de la figure 308.

En prolongeant la courbe de la figure 311 vers l'origine, on constate que l'effort d'accostage est nul pour une épaisseur nulle ce qui cadre parfaitement avec les hypothèses ci-dessus.

$F_1 v$ représente l'effort de forgeage. Plus la vitesse est grande, plus le temps de passage sous les galets est court et plus l'effort de forgeage doit donc être important.

En toute logique F_1 devrait varier en fonction de la largeur des galets (2 e + 3).

En soudage de tôles d'acier doux de 0,8 à 1,5 mm, F_1 est apparemment constant. Il faut probablement chercher l'explication de cette constatation dans le fait que le forgeage doit surtout être efficace à l'endroit le plus chaud, c'est-à-dire au centre du cordon, où se forme le dôme, et que cette zone (fig. 310) n'est pas nécessairement proportionnelle à la largeur des galets.

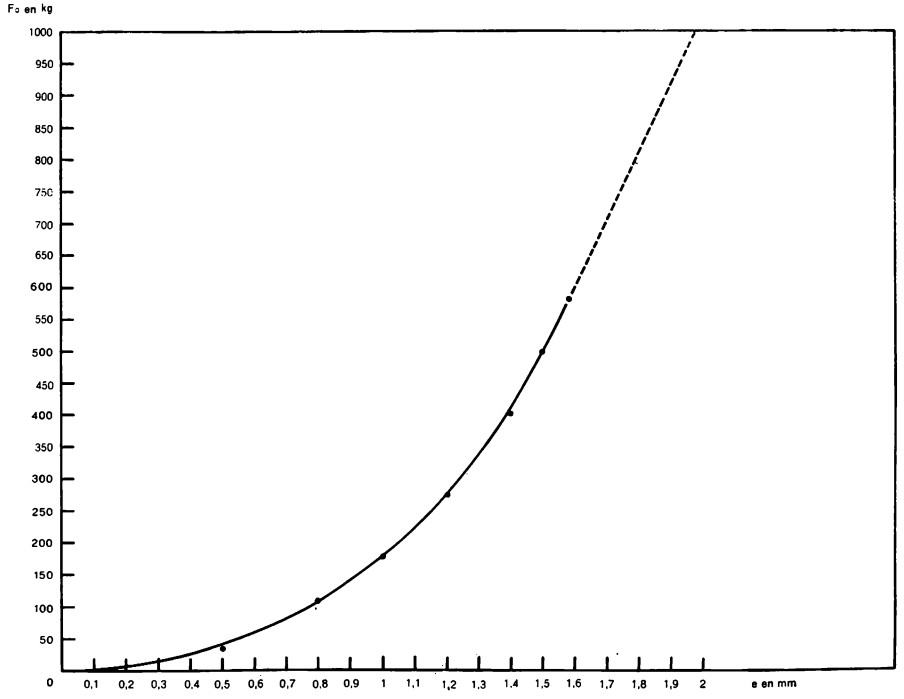


Fig. 311

EFFORT SUR SOUDURE - COURANT DE SOUDAGE

En examinant la figure 303 (page 310), on constate que pour compenser une augmentation de l'effort sur soudure, il faut augmenter l'intensité de soudage.

En d'autres termes, qu'une augmentation de l'effort provoque une diminution de largeur de cordon soudé.

Cette influence est nette et caractéristique. Elle doit vraisemblablement être en relation avec la variation de résistance de contact provoquée par une augmentation de l'effort sur soudure.

On estime que l'accroissement du courant est liée à l'accroissement de l'effort par la relation

$$\Delta I = \Delta F \times 20 \text{ e}$$

mais cette relation devrait être vérifiée par des expériences plus nombreuses.

EXEMPLES NUMÉRIQUES

A) Soit à souder des tôles d'épaisseur 1 mm. La machine dont on dispose est une soudeuse de P max. = 100 kVA avec une tension maximum secondaire de 5 V.

L'intensité maximum secondaire est donc de :

$$\frac{100\,000}{5} = 20\,000 \text{ A.}$$

En supposant que la vitesse de soudage n'est pas limitée pour des raisons de formes ou d'encombrement des pièces, nous déterminons successivement les paramètres :

$$I = 20\,000 = 10\,600 + 2\,260\ v \qquad \text{(voir 40)}$$

d'où :

$$v = \frac{20\,000 - 10\,600}{2\,260} = \frac{9\,400}{2\,260} = 4{,}15 \text{ m/mn.}$$

Nous savons que :

$$v \times t_c = 2{,}5 + 2{,}5 \text{ e} \qquad \text{(voir VI)}$$

$$v \times t_c = 5$$

d'où :

$$t_c = \frac{5}{4{,}15} = \pm 1 \text{ période}$$

et que :

$$t_c = t_r = 1 \text{ période.}$$

Le pas de soudure sera de :

$$= 0{,}66\ v.\ t_c \qquad \text{(voir V)}$$
$$= 0{,}66 \times 4{,}15 \times 1$$
$$= 2{,}75 \text{ mm.}$$

L'effort sur soudure sera de 550 kg (voir diagramme fig. 307).

B) Si, par contre, la vitesse de soudage est limitée pour des raisons quelconques à 2 m par minute, nous en déduisons :

$$I = 10\,600 + (2\,260 \times 2)$$
$$= 15\,100 \text{ A.}$$

La puissance maximum requise sera de :

$$15\,100 \times 5 = \pm 75 \text{ kVA,}$$

si l'impédance du circuit secondaire de la machine est telle qu'il faut 5 V pour débiter 15 100 ampères.

Le temps de chauffe se détermine par :

$$v \times t_c = 5$$
$$t_c = \frac{5}{2} = 2\,\frac{1}{2}$$

soit par exemple $t_c = t_r = 2$ périodes

Le pas sera :

$$= 0{,}66\ v \times t_c$$
$$= 0{,}66 \times 2 \times 2$$
$$= 2{,}65 \text{ mm.}$$

L'effort sur soudure sera de 350 kg (fig. 307).

CONCLUSIONS

La présente étude est un essai de détermination des influences des paramètres les uns sur les autres.

Elle conduit à des résultats se justifiant par la pratique. Il est évident que l'on peut s'écarter des données de base et conserver un résultat acceptable c'est-à-dire une soudure étanche.

Notons cependant que, dans ces cas, on vérifie :

1° que pour une largeur soudée différente de la largeur déterminée par la formule (I), l'intensité I se calcule :

$$I = I_{\text{VII}} \times \frac{L}{L_{\text{I}}}$$

I = intensité requise.
I_{VII} = intensité déterminée par la formule VII.
L_{I} = largeur de cordon déterminée par la formule I.
L = largeur de cordon adoptée;

2° que pour un rapport :

$$k = \frac{t_c}{t_c + t_r} \neq 0{,}5$$

l'intensité requise se calcule approximativement :

$$I = I_{\text{VII}} \times \sqrt{\frac{0{,}5}{k}}$$

I = intensité requise.
I_{VII} = intensité déterminée par la formule VII

$$k = \frac{t_c}{t_c + t_r}.$$

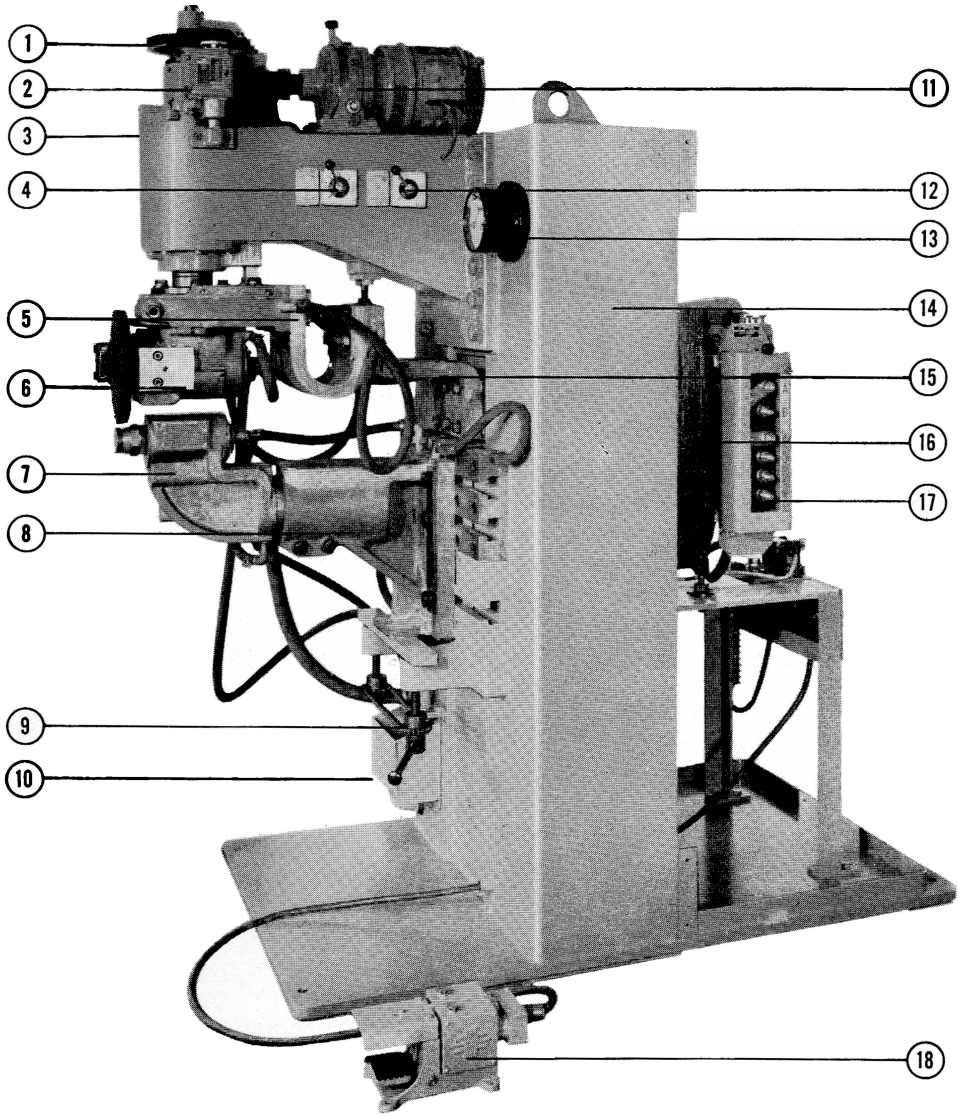


Fig. 312
Machine à souder au galet.

LES MACHINES A SOUDER AU GALET

CLASSIFICATION

En général les machines à souder au galet sont des machines fixes. Il existe une application de soudeuse mobile à galets dans l'industrie des fabrications automobiles, pour le soudage des rejets d'eau ou de la jupe d'une voiture.

La majorité des machines à galets sont simples et il n'existe que quelques rares applications de machines multigalets (raboutage de feuillards, soudage de cuves de frigos, plaquetage d'obus).

ÉLÉMENTS D'UNE MACHINE A SOUDER AU GALET

Les parties principales constituant une machine à souder au galet sont :

— le transformateur de soudage destiné à fournir aux pièces à souder le courant de soudage;

— le circuit secondaire extérieur destiné à amener le courant de soudage du transformateur aux têtes et galets de soudage;

— les têtes de soudage;

— les galets de soudage;

— un système de mise sous pression des galets de soudage, destiné à fournir l'effort de compression localisé sur les pièces à souder;

— un système d'entraînement des galets de soudage;

— un bâti;

— un circuit électrique auxiliaire de commande;

— un appareillage électronique ayant pour but le réglage du courant de soudage, du temps de soudage et du temps de repos.

La figure 312 montre les parties constitutives d'une machine à souder au galet :

1. Transmission par engrenages pour la commande du galet supérieur.
2. Interrupteur à pression.
3. Cylindre de pression.
4. Interrupteur-inverseur « Marche - Arrêt » du moteur.
5. Flexible en cuivre lamellé.
6. Tête supérieure pivotante autour de son axe vertical.
7. Tête inférieure transversale.
8. Bras inférieur en alliage de cuivre à haute conductibilité.
9. Vérin pour le réglage en hauteur du bras inférieur.
10. Collecteur d'évacuation d'eau.
11. Groupe moteur-variateur.
12. Interrupteur « O-soudage ».
13. Ampèremètre de contrôle.
14. Bâti tout acier — construction soudée.
15. Connexion supérieure en cuivre coulé.
16. Transformateur de soudage — séché et imprégné sous vide.
17. Commutateur à barrettes pour le réglage de la puissance (8 positions).
18. Pédale de commande.

LE TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ

Le transformateur monophasé fournit l'énergie électrique nécessaire à la fusion du cordon de soudure.

Nous ne considérons que le transformateur monophasé car c'est le type presque exclusivement utilisé dans les machines à souder au galet.

Le transformateur est semblable au point de vue construction, au transformateur de soudage par point décrit antérieurement.

Remarquons toutefois que le facteur de marche d'une soudeuse est très élevé et qu'en général le facteur de marche à la puissance maximum est de 50 % ou plus.

Nous rappelant ce qui fut dit au sujet du rendement maximum que l'on atteint ou presque pour $t_c = t_r$ nous concevons que le facteur de marche ne dépassera que difficilement 50 %. Toutefois pour le soudage à grande vitesse avec passage continu du courant le F.d.M. peut atteindre 80 % à 100 %. Dans certains cas le facteur de marche à la puissance max. est ramené à 25 ou 30 % lorsque l'on peut compter sur des temps de manutention des pièces, importants par rapport au temps de soudage proprement dit.

LE CIRCUIT SECONDAIRE EXTÉRIEUR

Le circuit secondaire ou circuit de soudage est constitué de pièces largement dimensionnées en alliage de cuivre coulé (Cu = 99,5 %; Cr = 0,5 %).

La partie supérieure du circuit (15, fig. 312) relie une borne du transformateur à la tête supérieure par l'intermédiaire d'un flexible (5, fig. 312), constitué de tôles de cuivre de faible épaisseur (0,2 mm).

Cette partie supérieure du circuit n'a aucun rôle mécanique à jouer. Elle est refroidie par circulation d'eau au travers de tubes d'acier coulés dans la masse ou de tubes de cuivre soudés à l'étain.

La partie inférieure (8, fig. 312) du circuit de soudage a en général un rôle mécanique à jouer. Elle doit reprendre l'effort sur soudure et constitue en fait le bras inférieur de la machine.

Son dimensionnement est par conséquent plus important que celui de la partie supérieure et c'est pourquoi cette partie n'est généralement pas refroidie par circulation d'eau.

LES TÊTES DE SOUDAGE

Les têtes de soudage (6 et 7 fig. 312) portent les galets de soudage. Elles sont refroidies par circulation d'eau. Elles ont comme mission de transmettre aux galets :

a) l'effort développé par le système de mise sous pression;

b) le mouvement de rotation du système d'entraînement;

c) le courant de soudage.

a) et *b*) sont des problèmes mécaniques qui n'offrent aucune difficulté particulière mais ce n'est pas le cas de la transmission du courant qui doit passer d'une partie fixe à une pièce mobile. On se souvient en effet qu'il est question d'intensités de une à plusieurs dizaines de milliers d'ampères.

Quatre systèmes sont utilisés pour assurer la transmission du courant :

Les coussinets lisses

Les coussinets lisses servent à la fois de paliers et reprennent par conséquent l'effort.

Cette solution est valable pour les faibles intensités mais présente l'inconvénient de n'offrir qu'une surface de contact relativement faible et dépendant de l'effort exercé.

Les paliers à aiguilles

Les paliers à aiguilles en alliages de cuivre (généralement de bronze Tobin). Les aiguilles sont dimensionnées de façon à reprendre l'effort et à assurer la transmission du courant sans subir de déformations permanentes et s'échauffer exagérément.

Cette solution apporte une amélioration certaine par rapport à l'exécution à palier lisse.

Les têtes à bain de mercure

Dans les têtes à bain de mercure, l'effort sur soudure est repris par des roulements à billes, à aiguilles en acier ou par des paliers en matière plastique et la transmission du courant est assurée par une couronne barbotant dans un bain de mercure.

Le système est efficace et mécaniquement plus robuste que les deux précédents. Il offre du point de vue électrique des avantages incontestables quoique l'on doive mentionner comme inconvénient l'oxydation du mercure, les nettoyages fréquents requis, la nécessité de disposer de pièces coulées exemptes de porosités et le phénomène de l'amalgame entre mercure et cuivre.

Les têtes à frotteurs

Les têtes à frotteurs constituent une autre solution qui présente l'avantage de la robustesse puisque l'effort est également repris par des éléments indépendants de la transmission du courant.

La transmission du courant est assurée par des frotteurs en alliage de cuivre recouvert d'une couche (2 à 4 mm) d'argent. Ces frotteurs appliqués sur les surfaces de frottement n'exigent pratiquement aucun entretien.

L'inconvénient de cette solution réside dans les dimensions importantes que l'on doit donner aux têtes pour loger les frotteurs.

On distingue en outre les têtes longitudinales et les têtes transversales.

La figure 313 montre une machine à têtes longitudinales et la figure 314 une machine à têtes transversales.

Il existe également des têtes universelles telle par exemple la tête supérieure de la machine (fig. 315).

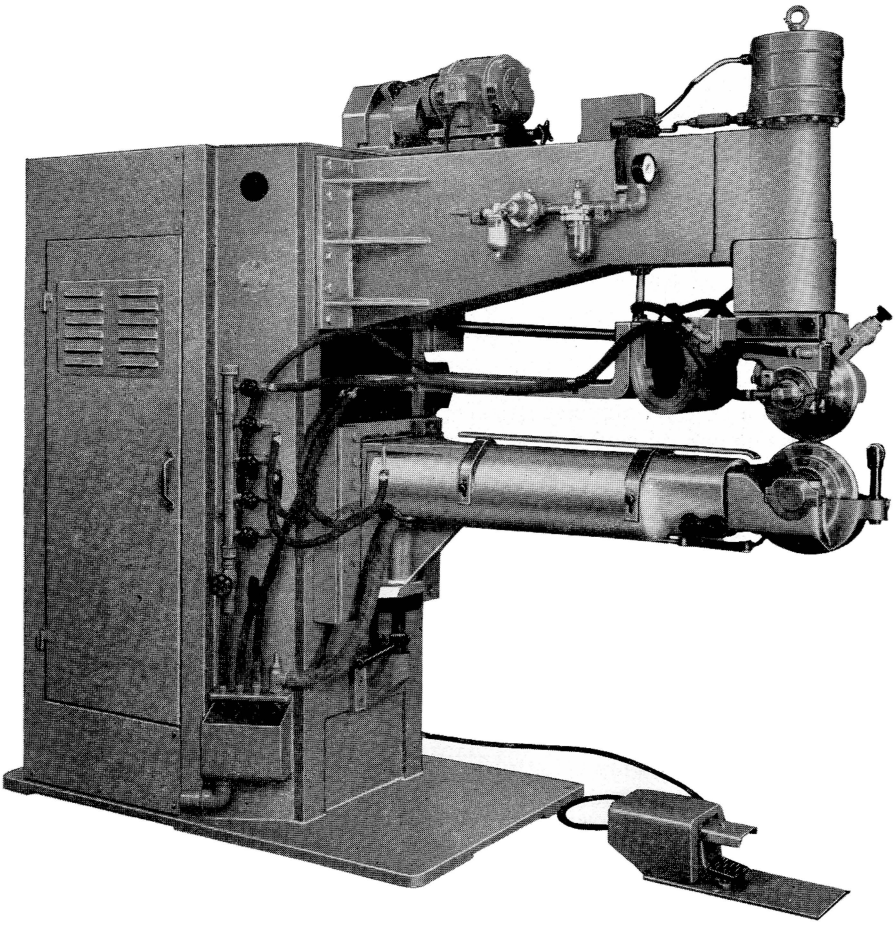


Fig. 313
Machine à souder au galet à têtes longitudinales.

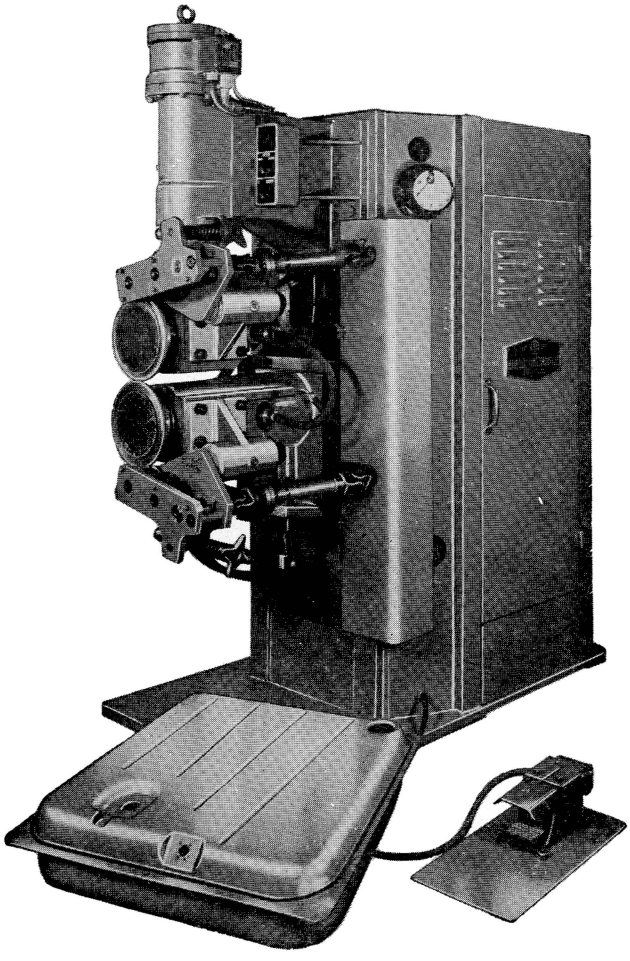


Fig. 314
Machine à souder au galet à têtes transversales.

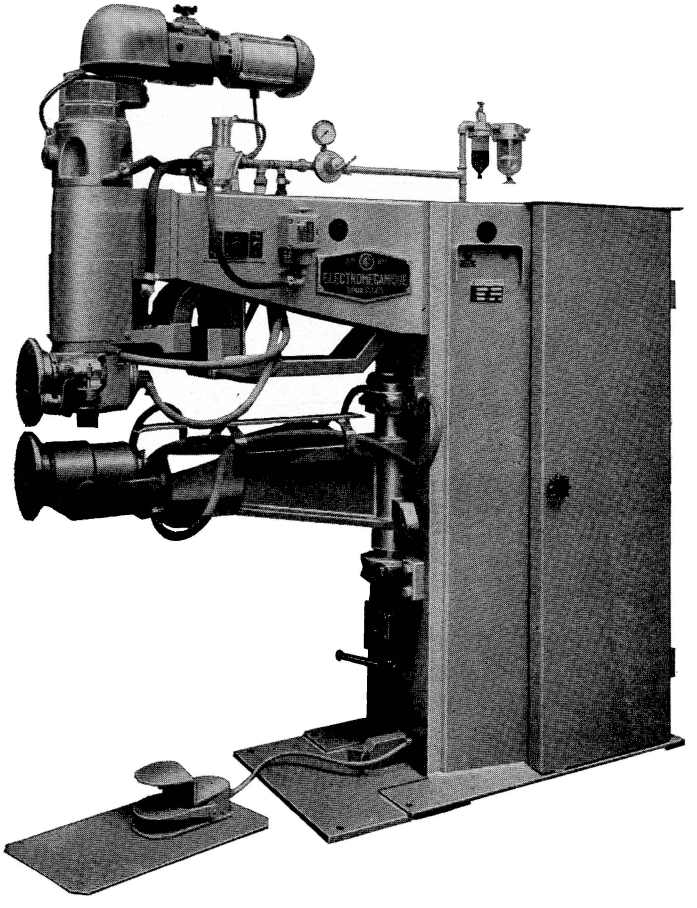
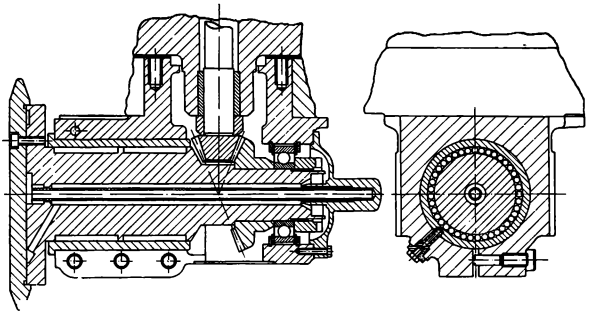


Fig. 315

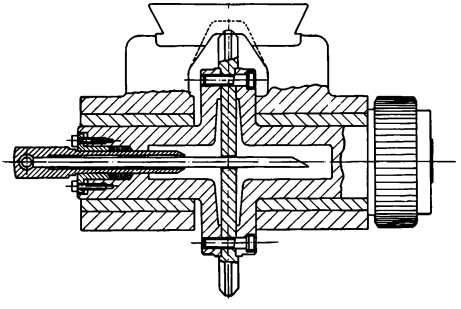
Machine à souder au galet à tête supérieure universelle.

Au point de vue entraînement des galets, il faut distinguer trois grandes catégories :

— les têtes à entraînement axial (fig. 316);
— les têtes à entraînement tangentiel du galet (fig. 317);
— les têtes libres.



a



b

Fig. 316

a) Tête de soudage avec galet en porte-à-faux,
b) Tête de soudage avec galet sur double palier.

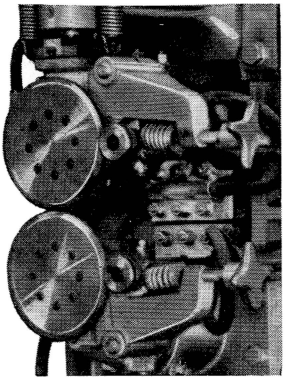


Fig. 317
Galets supérieur et inférieur commandés par molettes tangentielles.

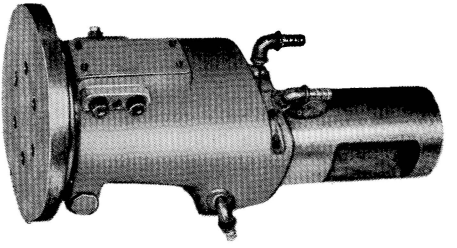


Fig. 318
Tête normale inférieure transversale.

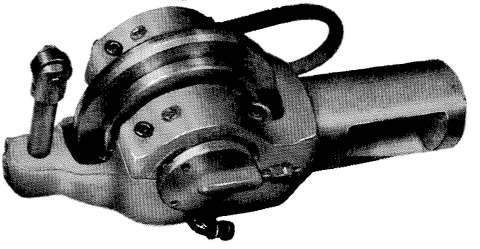


Fig. 319
Tête normale inférieure longitudinale.

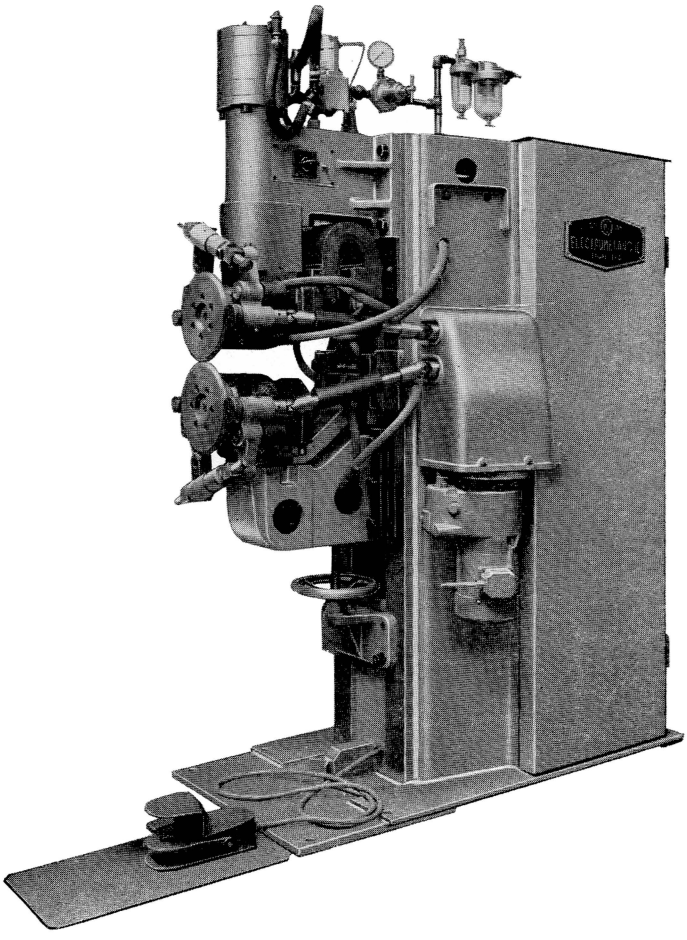


Fig. 320

En général, une machine à souder de construction courante comporte une tête supérieure universelle (c'est-à-dire pouvant être placée en position transversale ou longitudinale) à entraînement axial et une tête inférieure transversale ou longitudinale libre (fig. 318 et 319).

Lorsque les vitesses des galets supérieurs et inférieurs doivent être rigoureusement les mêmes, pour éviter qu'elles ne patinent (dans le cas du soudage de tôles plombées par exemple) on a recours à l'entraînement tangentiel des galets supérieur et inférieur (fig. 320).

Une autre solution est d'avoir recours à l'entraînement axial des deux galets au moyen d'un différentiel.

Les figures 321 à 326 montrent diverses combinaisons de têtes supérieures et inférieures.

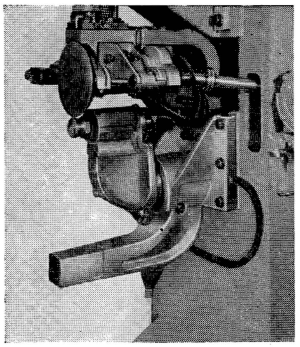


Fig. 321

Galet inférieur de petit diamètre monté sur aiguilles.

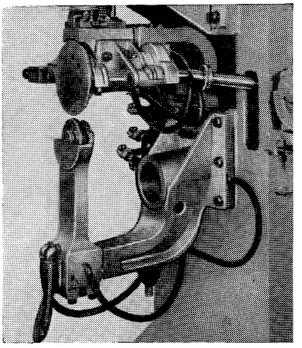


Fig. 322

Bras inférieur spécial pour la fabrication de réservoirs de motos.

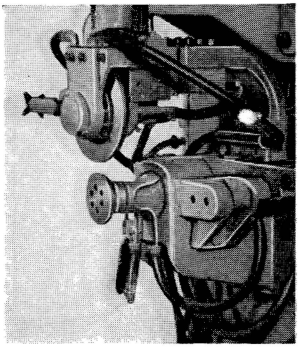


Fig. 323

Galet supérieur libre. Galet inférieur commandé par engrenages.

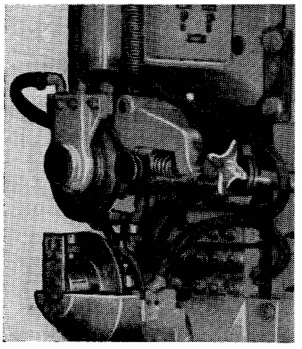


Fig. 324

Galet supérieur entraîné par molette tangentielle. Galet intérieur libre.

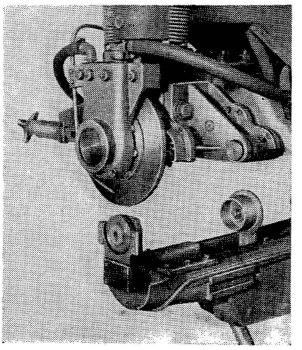


Fig. 325

Tête supérieure commandée par engrenages. Galet inférieur libre.

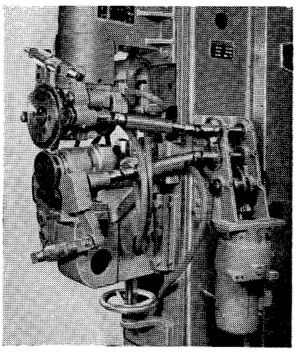


Fig. 326

Tête inférieure inclinée pour faciliter l'accès au droit de la soudure.

LES GALETS DE SOUDAGE

Les galets de soudage sont fixés par vis à l'axe porte-galet.

Le matériau utilisé pour les galets est similaire au matériau pour électrodes de soudage par point. C'est un alliage de cuivre faiblement allié, lequel a la propriété de garder une dureté d'environ 180 Br jusque 5 à 600 °C.

Les machines à souder sont souvent équipées de dispositifs de reprofilage automatique des galets, afin de maintenir la largeur des galets à une valeur constante.

SYSTÈME DE MISE SOUS PRESSION DES GALETS

La mise sous pression des galets se fait généralement par l'action d'un piston pneumatique.

On connaît des exécutions où l'effort sur soudure s'obtient par cylindre hydraulique, ou par un système de contrepoids, mais ce sont là des exceptions.

L'effort sur soudure étant constant, il n'y a donc pas de circuit pneumatique permettant d'assurer une variation de pression comme cela peut être le cas en soudage par point.

L'admission de l'air comprimé au cylindre est permise par une électrovanne commandée généralement par une pédale électrique (18, fig. 312, p. 328).

L'air comprimé est filtré, détendu à la pression requise et lubrifié par de fines gouttelettes d'huile avant d'être admis au cylindre, comme décrit dans le chapitre des machines à souder par point.

SYSTÈME D'ENTRAINEMENT DES GALETS

Deux systèmes d'entraînement des galets sont utilisés :

— l'entraînement axial;

— l'entraînement tangentiel.

Les vitesses de soudage étant relativement faibles (en pratique de 1 à 10 m/mn max.) les vitesses de rotation varient en moyenne de 1,5 à 15 tours/mn pour l'entraînement axial et de 6 à 60 tr/mn pour l'entraînement tangentiel.

Par rapport à un moteur tournant à 1 500 tr/mn cela correspond à des réductions très importantes.

Les vitesses doivent pouvoir varier dans des limites assez grandes puisque nous signalions 1 à 10 m/mn comme l'étalement le plus courant des vitesses de soudage.

Le système d'entraînement doit donc comporter un moteur-réducteur et presque toujours un variateur de vitesse.

On peut grouper le système d'entraînement et de mise sous pression des galets tel que le montre la figure 327.

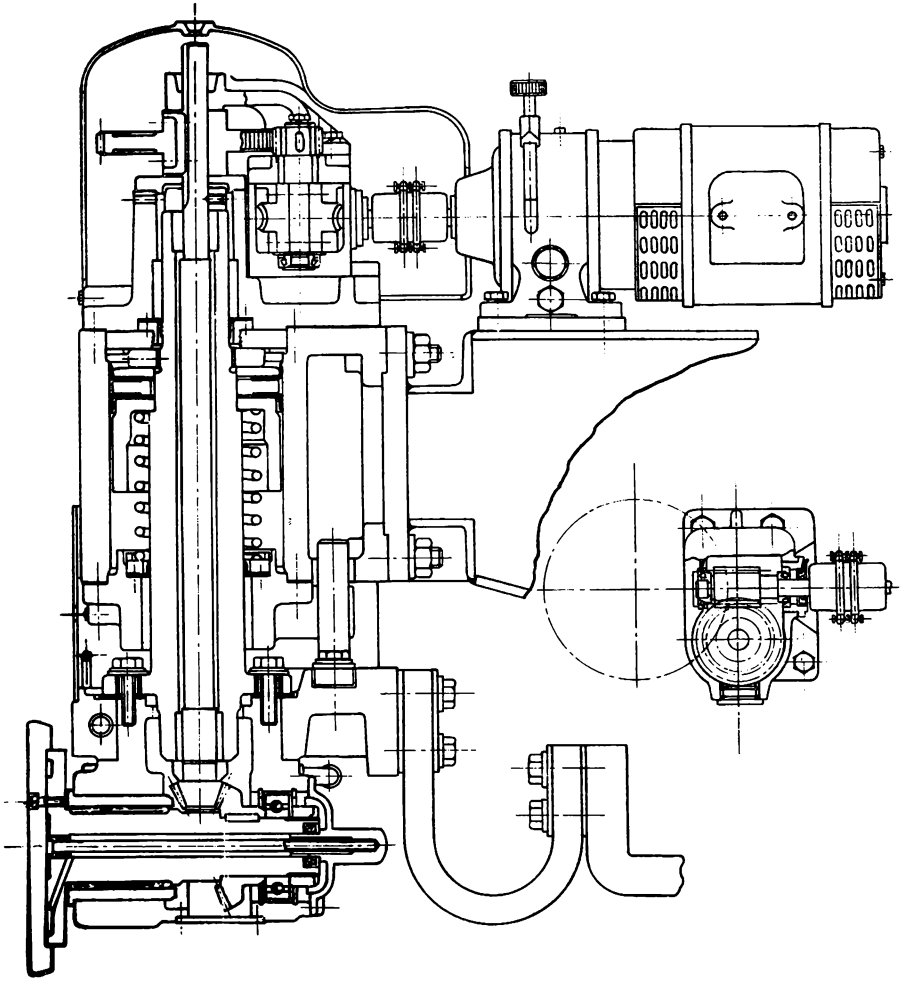


Fig. 327

Mécanisme de commande d'un galet supérieur.

On peut également commander l'entraînement par un moteur continu, qui est alimenté par des redresseurs et dont on règle la vitesse par action sur le champ magnétique.

L'APPAREILLAGE ÉLECTRONIQUE

Le soudage au galet est une succession de points de soudure; il faut en conséquence provoquer des interruptions périodiques du courant de soudage.

Ces interruptions s'obtiennent sans difficultés au moyen d'appareils électroniques à contacteur à ignitrons.

Il faut mentionner pour mémoire, car leur utilisation est depuis longtemps abandonnée, les rupteurs mécaniques synchronisés et les rupteurs semi-électroniques, tout comme les modulateurs rotatifs du courant de soudage. Les appareils électroniques modernes pour soudeuse au galet sont basés sur les mêmes principes que ceux décrits d'une façon explicite pour les appareils de contrôle de machines à souder par points.

Ils sont synchrones et ne comportent que deux temporisations : le temps de chauffe et le temps de repos lesquels se succèdent sans interruption tant que reste enclenchée la pédale de commande de la machine.

Tous les appareils comprennent un système de réglage électronique de l'intensité, par déphasage de l'instant d'allumage des ignitrons.

Dans des cas particuliers, les appareils permettent d'obtenir l'établissement progressif du courant de soudage; lorsque l'on veut éviter les projections provoquées parfois par le premier point d'un cordon ou lorsque l'opération de soudage doit démarrer, les galets étant à l'arrêt.

Certains appareils sont équipés d'un système de compensation automatique des variations de courant de soudage, comme il s'en produit par exemple lors de l'introduction d'une virole en acier dans les bras de la machine.

Un appareil électronique pour machine à souder au galet et de construction standard est représentée à la figure 328.

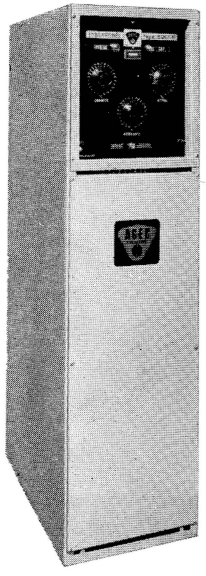


Fig. 328

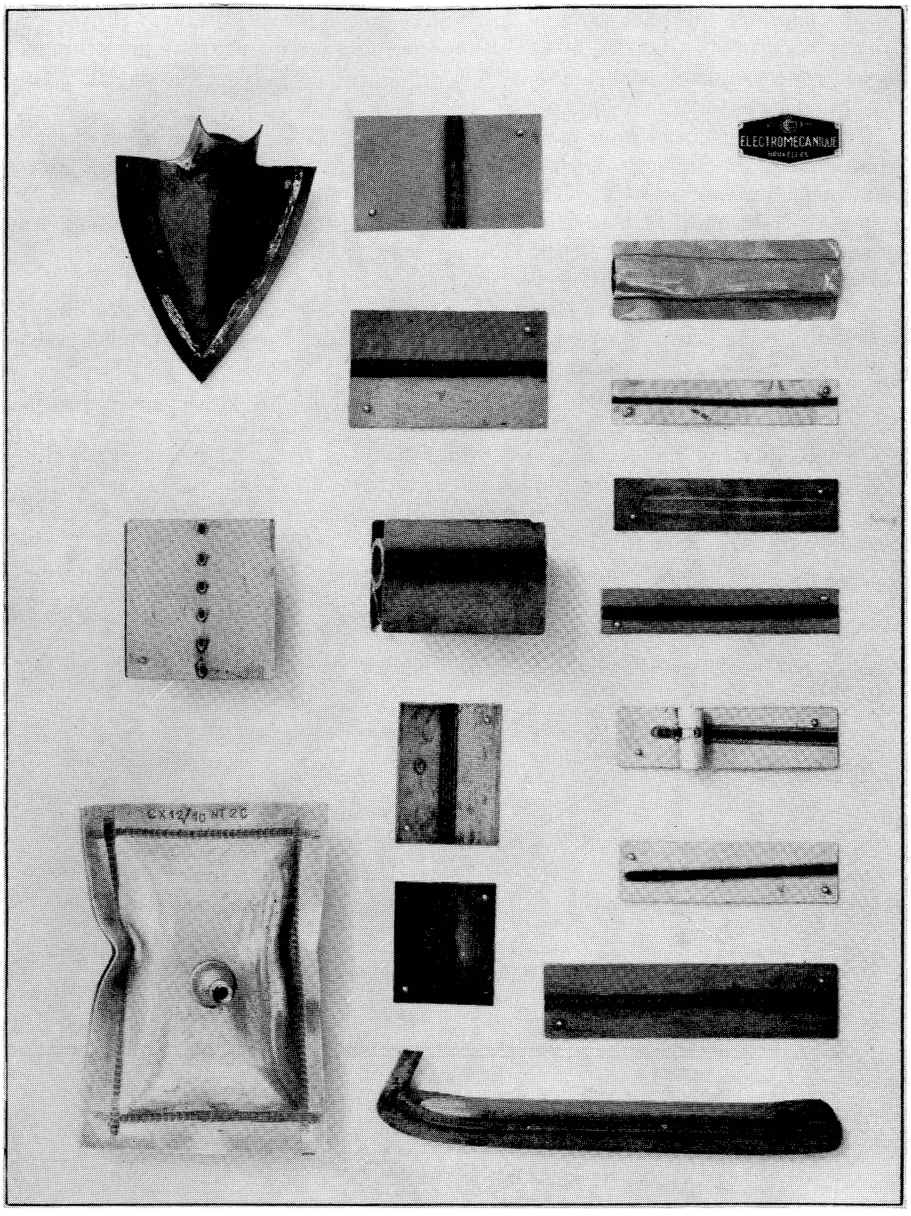


Fig. 329
Quelques exemples d'échantillons soudés au galet.

CHAPITRE VI

PROCÉDÉS PARTICULIERS DE SOUDAGE AU GALET

SOUDAGE PAR ÉCRASEMENT

Le soudage par écrasement s'obtient en superposant légèrement les tôles à souder.

La valeur du recouvrement est de l'ordre de 1 à 1,5 fois l'épaisseur des tôles (fig. 330).

De larges galets plats assurent non seulement la soudure, mais aussi l'écrasement ou le forgeage des deux bords de tôles.

Cette action de forgeage qui se produit en même temps que l'échauffement du métal jusqu'à l'état plastique a donné le nom de soudage par écrasement à ce mode opératoire spécial de soudage au galet.

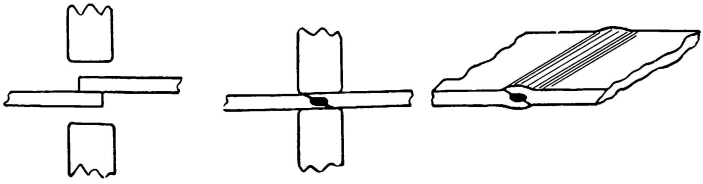


Fig. 330
Soudage au galet par écrasement sur deux faces.

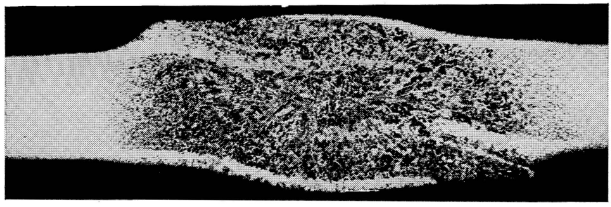


Fig. 331
Macrographie d'une soudure au galet par écrasement.

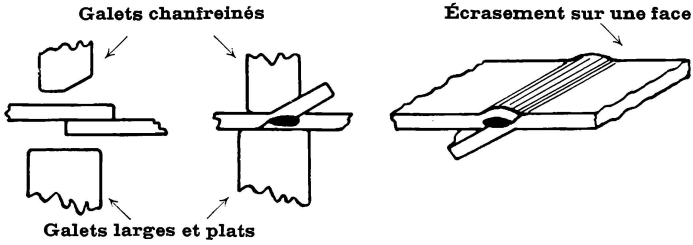


Fig. 332
Soudage au galet par écrasement sur une face : utilisation d'un galet plat et d'un galet chanfreiné.

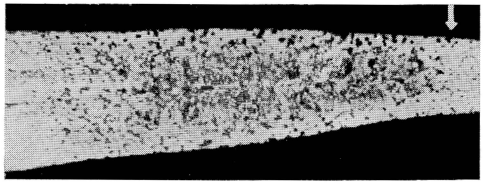


Fig. 333
Macrographie d'une soudure au galet par écrasement sur une face

Le joint étant recouvert au-dessus et en dessous par la surface des galets de soudage et latéralement par le métal lui-même, il ne se produit pas de projections de particules métalliques.

Il existe une variante du procédé: le soudage par écrasement sur une face (fig. 332) grâce à l'utilisation d'un galet chanfreiné.

Cette variante convient particulièrement lorsqu'on exige une surface lisse sur la face apparente du joint et que la surépaisseur peut être tolérée sur l'autre face.

La méthode de travail est dans ses grandes lignes la même sauf que la position du recouvrement par rapport à l'axe des galets et l'angle du chanfrein jouent un rôle bien déterminé. (On recommande un angle de 7°).

Notons enfin que cette variante exige moins de précision dans la valeur du recouvrement qui peut varier entre 2 et 5 fois l'épaisseur sans nuire à la qualité du joint soudé.

La figure 331 montre une macrographie d'une bonne soudure par écrasement.

La figure 333 montre une macrographie d'une soudure par écrasement sur une face.

L'application de ces deux procédés est limitée aux tôles d'épaisseur relativement faible comprise entre 0,8 et 1,5 mm.

Cette technique de soudage s'utilise souvent pour le soudage d'articles devant être émaillés par la suite.

On recommande les réglages repris au tableau ci-dessous :

Epaisseur de la tôle en mm (1)	Recouvrement initial en % de l'épaisseur de la tôle (2)	Vitesse de soudage en m/mn	Courant A (3)	Effort sur électrodes en kg (4-5)
0,8	150	3,25	13 000	410
1,25	150	2	16 000	680
1,95	125	1,40	19 000	1 135

Notes : 1. Acier doux à basse teneur en carbone.
2. Pour obtenir des soudures avec un écrasement égal sur chaque face.
3. Courant non-interrompu.
4. Galet en métal classe III-R. W. M. A.
5. Dimensions du galet : ⌀ 250 mm - Largeur 12,5 mm.

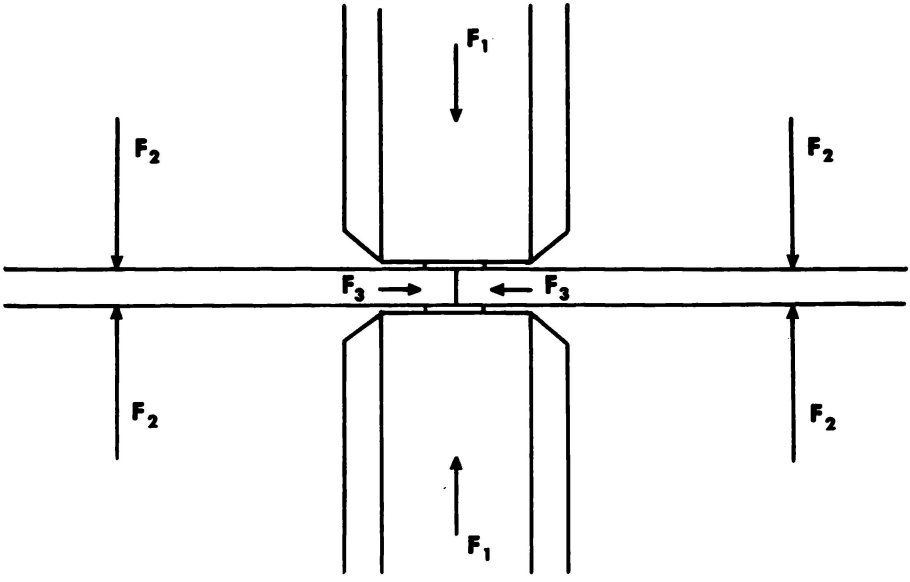


Fig. 334

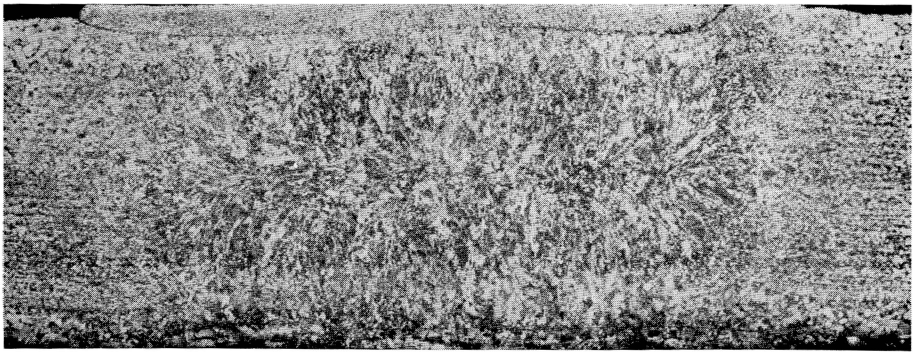


Fig. 335
Macrographie d'un joint soudé, montrant la fusion des bords des tôles.

SOUDAGE AU GALET EN BOUT AVEC APPORT DE MÉTAL SUR UNE OU DEUX FACES

Le besoin de réaliser des joints continus étanches sans surépaisseur a provoqué la mise au point de cette variante du soudage au galet.

Le procédé est schématisé à la figure 334.

Les tôles à rabouter sont juxtaposées et clamées (forces $F2$).

Les galets de soudage sont centrés par rapport à l'axe du joint.

Entre les galets et les tôles à assembler on interpose un feuillard en acier doux d'une épaisseur de 0,2 mm environ et de 4 mm de largeur.

Ce feuillard assure une résistance de contact plus régulière et répartit le courant de soudage entre les deux bords des tôles à assembler.

Sous l'effet du dégagement calorifique, le métal a une forte tendance à se dilater, mais comme l'effort de clamage $F2$ a été choisi supérieur à l'effort sur soudure $F1$, la dilatation se produit en un effort $F3$ perpendiculaire au joint.

Sous l'effort conjugué de $F1$ et $F3$ on obtient le forgeage du joint et la soudure réalisée prend l'aspect indiqué à la macrographie (fig. 335).

Le procédé décrit ci-dessus a été appliqué à des tôles d'épaisseur allant de 1 à 4 mm avec des vitesses respectives de 4 à 0,8 m/mn.

Il est utilisé pour le raboutage de tôles de grande largeur (tel que pour la réalisation de pans latéraux de voitures de chemins de fer (fig. 336) mais aussi pour le soudage de réservoirs (de motos, par exemple).

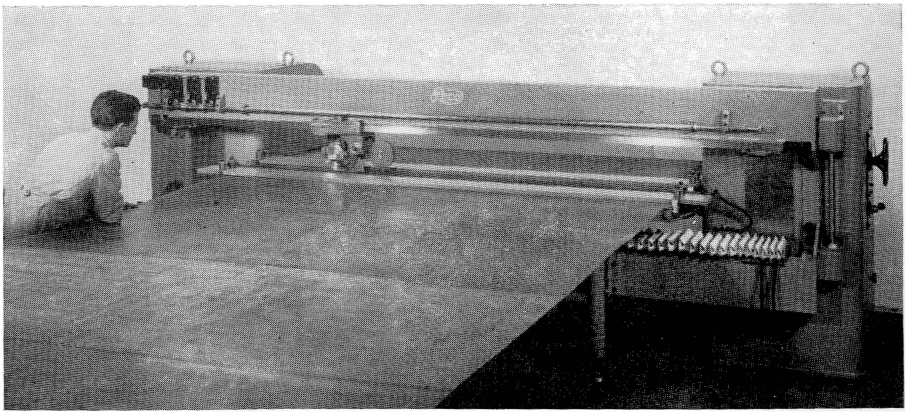


Fig. 336

Machine à portique permettant de réaliser des assemblages au galet bout à bout de tôles de 3,50 m de large et de 0,8 à 4 mm d'épaisseur.

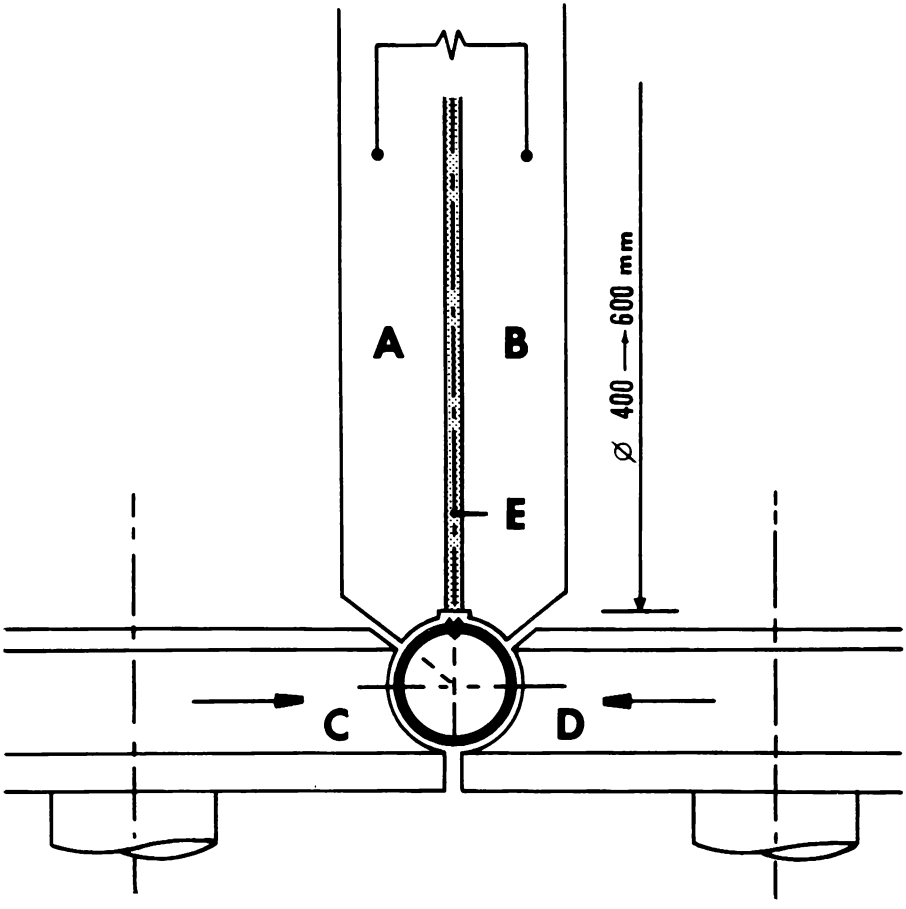


Fig. 337

Schéma de principe du soudage au galet bout à bout par refoulement.

A et B : galets de soudage - C et D : galets de pression - E : isolant.

SOUDAGE AU GALET BOUT A BOUT PAR REFOULEMENT

Cette variante de soudage au galet est utilisée dans la fabrication continue de tubes en partant de feuillards.

C'est un procédé élégant et de haute productivité. Le procédé est schématisé à la figure 337.

Le feuillard sous forme de bobine est déroulé et passe sous une série de galets de formage lesquels en font un tube rejoint.

Ce tube rejoint est guidé de façon précise sous les galets de soudage montés sur un même axe.

Le courant de soudage passe d'un galet à l'autre à travers les lèvres du feuillard sur lesquelles s'exercent l'effort des galets de pression et des galets de soudage.

On obtient un forgeage efficace qui produit à l'extérieur le bourrelet caractéristique des soudures en bout tandis qu'à l'intérieur du tube le bourrelet est de moindre importance.

Le bourrelet extérieur est enlevé automatiquement à l'outil de coupe. Parfois pour des tubes devant avoir des parois intérieures lisses (chaudières, par exemple) le bourrelet intérieur est enlevé également.

Après passage sous les galets et ébavurage du bourrelet à chaud, le tube est refroidi, calibré et tronçonné automatiquement à longueur.

Les vitesses de soudage que ce procédé permet d'atteindre sont élevées (de 20 à 60 m/mn).

Jusque 20 à 30 m/mn, selon la qualité de soudage requise, on fait usage de la fréquence de 50 Hz, mais au-delà on a recours à des groupes d'alimentation de 200 Hz.

La fréquence de 200 Hz produisant $2 \times 200 \times 60 = 24\,000$ alternances par minute on obtient 24 000 pulsations d'énergie par minute de sorte que pour la vitesse de 60 m/mn le pas des points de soudure est de $60\,000 : 24 = 2{,}5$ mm.

Le groupe a en plus l'avantage d'équilibrer le réseau triphasé.

Une autre particularité des machines à tubes est de faire usage d'un transformateur rotatif (les deux galets montés sur le même axe s'y raccordent directement).

La commutation du courant est de ce fait facilitée puisqu'elle se fait au primaire où les intensités sont beaucoup moins importantes.

Un des problèmes les plus délicats est la détermination de la largeur des feuillards par rapport au diamètre et à l'épaisseur du tube.

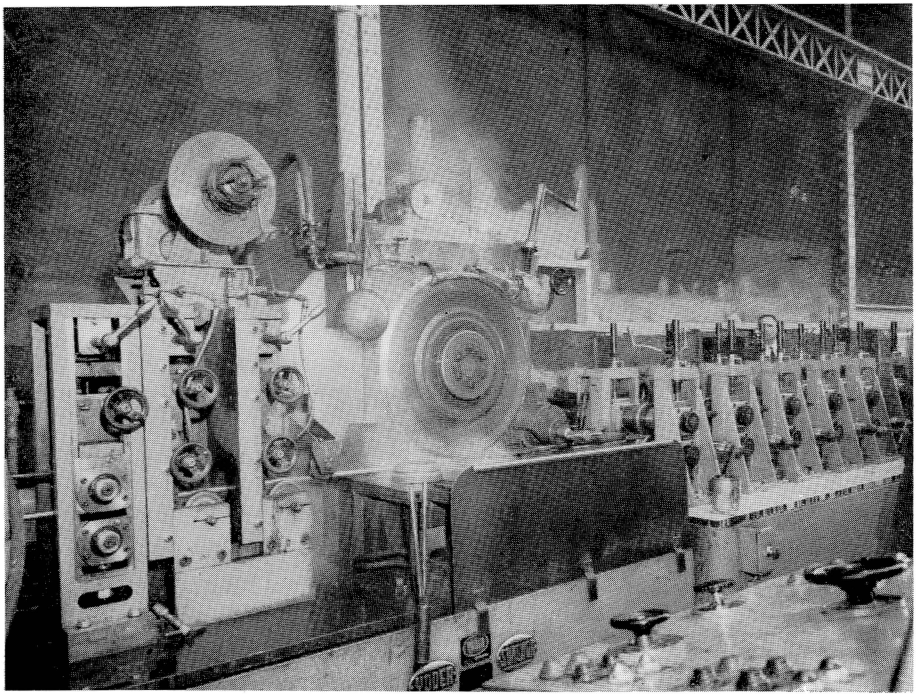


Fig. 338
Machine à former et souder les tubes en acier.

L'expérience confirme les règles ci-après :

e étant l'épaisseur en mm et d le diamètre extérieur du tube, la largeur du feuillard s'obtient en faisant la somme A + B + C + D :

Circonférence moyenne

$$A = 3{,}1416 \times (d - e).$$

Influence du moulurage

$$B = 0{,}5 \times e + 0{,}75 \text{ mm pour } 8 < \frac{d}{e} < 15$$

$$= 0{,}66 \times e + 0{,}75 \text{ mm pour } 16 < \frac{d}{e} < 25$$

$$= 0{,}75 \times e + 0{,}75 \text{ mm pour } 26 < \frac{d}{e} < 40$$

$$= e + 0{,}75 \text{ mm pour } 41 < \frac{d}{e} < 60.$$

Influence du refoulement

$$C = e \text{ pour } e < 1$$

$$= 0{,}66\ e \text{ pour } 1 < e < 4$$

$$= 0{,}50\ e \text{ pour } 4 < e < 6.$$

Influence du calibrage

$$D = 0{,}65 \text{ mm pour } 6 < d < 24 \text{ (calibrage 0,2 mm sur le } \varnothing)$$

$$= 1 \text{ mm pour } 25 < d < 36 \text{ (calibrage 0,3 mm sur le } \varnothing)$$

$$= 1{,}25 \text{ mm pour } 37 < d < 50 \text{ (calibrage 0,4 mm sur le } \varnothing).$$

Cette formule est valable pour l'acier doux.

Elle doit être évidemment vérifiée par des essais pratiques pour déterminer la largeur exacte.

La figure 338 représente une machine à former et souder les tubes, appliquant ce procédé.

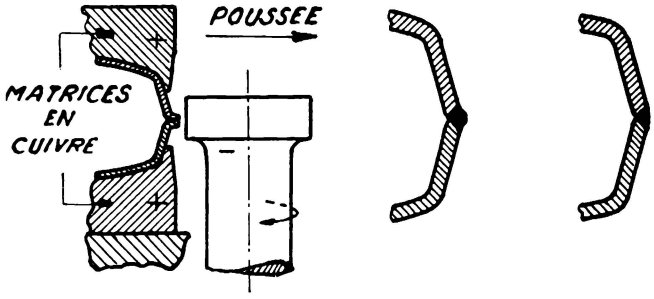


Fig. 339
Principe du soudage des corps creux.

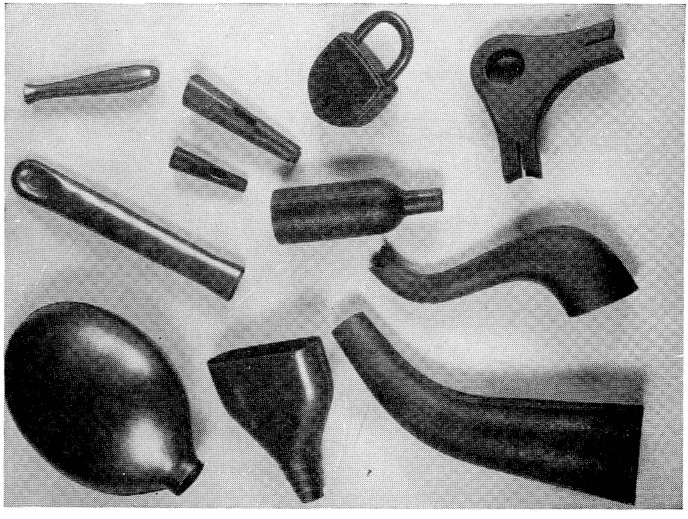


Fig. 340
Corps creux formés par le soudage bout à bout par fusion des bords.

SOUDAGE AU GALET PAR FUSION DES BORDS

Cette variante du soudage au galet a des applications limitées et est utilisée particulièrement pour assembler des corps creux.

La figure 339 présente schématiquement le principe du procédé.

Deux demi-coquilles superposées se touchent par leur bord, sur toute la périphérie. Elles sont enserrées dans une matrice en contact électrique constant avec la table sur laquelle elle repose.

La table est reliée à une des bornes du transformateur, l'autre borne étant connectée à un galet monté sur un axe vertical tournant.

Lorsqu'on approche les bords de la pièce à souder contre le galet, le courant de soudage traverse la matrice contenant les coquilles, traverse celles-ci et par les rebords en contact avec le galet retourne au transformateur.

Ici encore un échauffement produit par effet Joule amène la fusion des deux lèvres des coquilles en contact.

Pour disposer d'une quantité suffisante de métal fondu dans la zone du joint, on prévoit dès l'estampage des coquilles, une bavure d'estampage d'environ l'épaisseur de la tôle, et ce pour des tôles allant jusqu'à 1 mm d'épaisseur.

Au-delà de cette épaisseur, on arrivera à réaliser des corps creux par le même procédé en juxtaposant simplement bout à bout les coquilles.

On peut dans certains cas particuliers exécuter de telles soudures avec métal d'apport sous forme d'un fil ou d'un mince feuillard.

La figure 340 montre quelques corps creux fabriqués à l'aide de ce procédé.

CHAPITRE VII

LE SOUDAGE EN BOUT

DÉFINITION

Le soudage électrique en bout est un procédé de soudage autogène sans métal d'apport.

L'effet Joule d'un courant électrique traversant la résistance ohmique d'une portion de deux pièces métalliques placées bout à bout, ainsi que la résistance de contact de leurs surfaces est utilisé comme source calorifique pour porter ces surfaces à la température de soudage.

Un effort de forgeage est appliqué aux pièces lorsque la température voulue est atteinte.

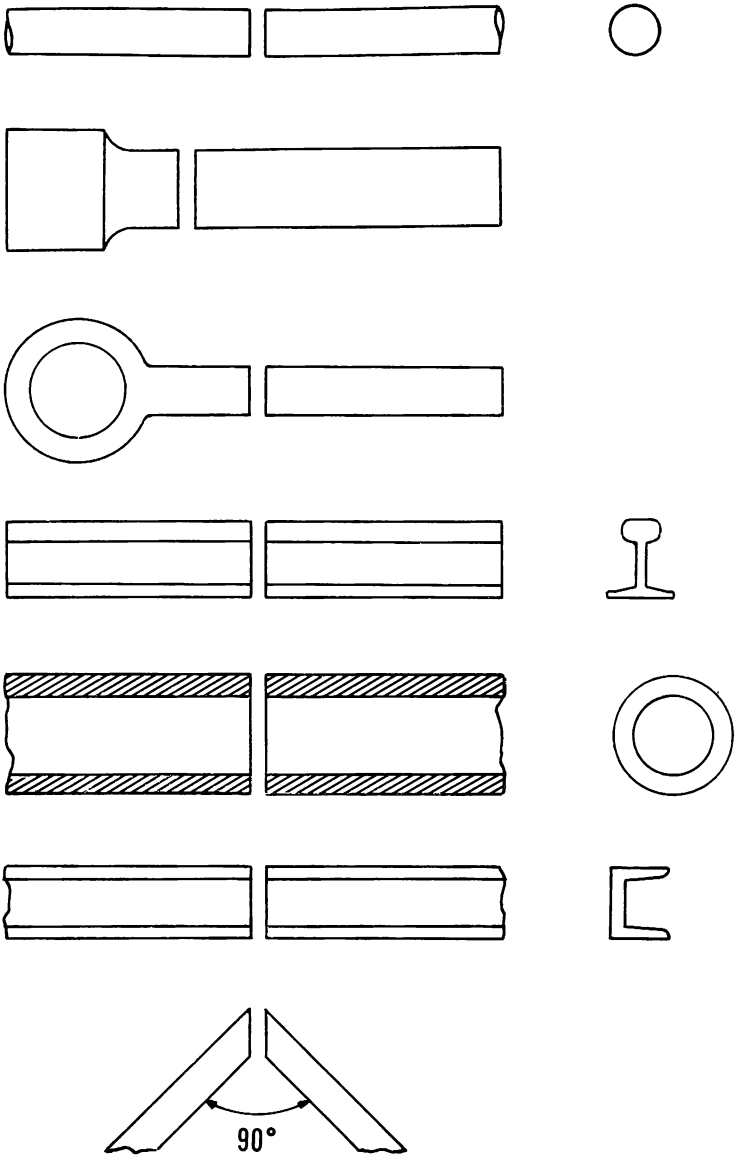


Fig. 341
Quelques types d'assemblages par soudage en bout.

BUT

Le soudage en bout se distingue des autres procédés classiques de soudage par points et au galet, non seulement par son mode opératoire, mais surtout par le fait que la soudure s'étend à la section entière des deux pièces assemblées, réalisant ainsi une pièce unique parfaitement continue au point de vue dimensions géométriques, sensiblement homogène au point de vue métallurgique et de résistance mécanique pratiquement uniforme.

Ce procédé permet de réaliser le raboutage rectiligne de ronds, carrés, profilés divers, tubes feuillards, etc., ou l'assemblage de pièces formant entre elles un certain angle (le plus souvent 90°) (fig. 341).

CLASSIFICATION ET PRINCIPES

On distingue trois procédés de soudage électrique en bout :

— le soudage en bout par résistance pure;
— le soudage en bout par étincelage direct;
— le soudage en bout par étincelage avec touches de préchauffage.

Dans la méthode de *soudage par résistance pure*, la tension électrique n'est appliquée aux pièces à souder que lorsque les faces de celles-ci sont déjà en contact sous pression assez élevée. L'échauffement est produit par effet Joule d'un courant électrique traversant la résistance ohmique des pièces mêmes et la résistance de contact aux faces des pièces.

Dans la méthode de *soudage par étincelage*, les pièces à souder sont mises sous tension, avant que leurs extrémités n'entrent en contact. L'échauffement est également produit par effet Joule, mais la résistance de contact existant aux faces des pièces est de nature particulière. L'échauffement est produit par le phénomène d'étincelage.

Le procédé de soudage *par étincelage avec touches de préchauffage* est un procédé mixte qui combine les deux premiers procédés. La phase initiale de chauffage par résistance pure, a pour but de préchauffer les extrémités à une certaine température avant de démarrer l'opération d'étincelage.

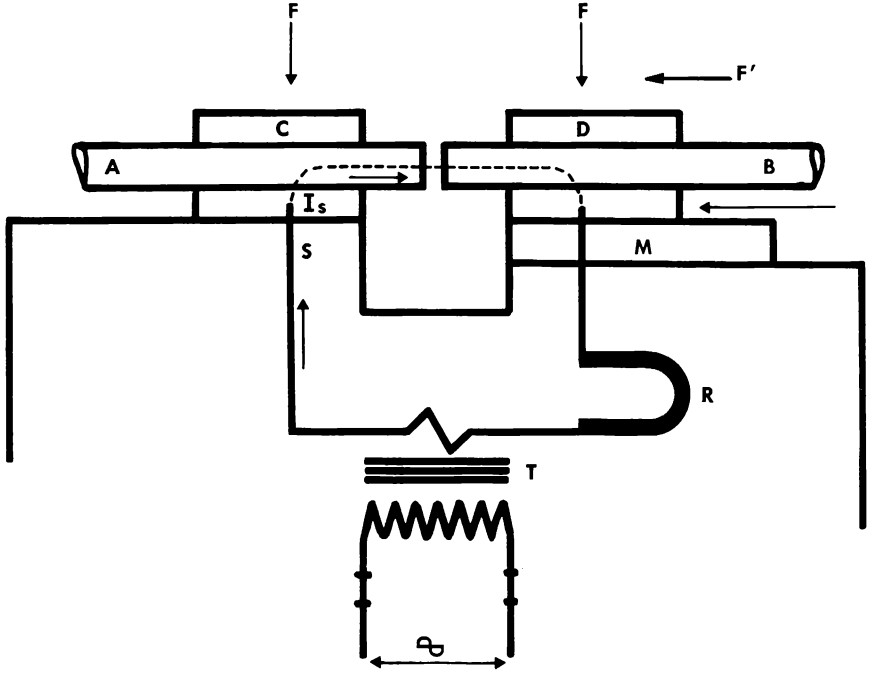


Fig. 342

Schéma de principe d'une machine à souder en bout.

A - B : pièces à souder serrées dans les machoires *C* et *D*;
C : dispositif de serrage fixe solidaire du bâti *E*;
D : dispositif de serrage fixé sur la table mobile *F*;
T : transformateur;
S : connexion secondaire fixe, fixée sur l'électrode gauche;
R : connexion secondaire souple reliée à l'électrode mobile.

LE SOUDAGE EN BOUT PAR RÉSISTANCE PURE

Les deux pièces à souder sont maintenues dans des mâchoires reliées électriquement à chacune des bornes du secondaire du transformateur de soudage. Un jeu de mâchoires de serrage est solidaire de la table fixe tandis que l'autre jeu de mâchoires est fixé sur la table mobile (fig. 342). Ces mâchoires mobiles transmettent aux pièces un mouvement relatif de translation l'une vers l'autre et l'effort de compression sur les faces à souder.

L'effort de serrage des pièces à souder sera suffisant pour assurer une bonne commutation du courant de soudage et pour empêcher tout glissement des pièces soumises à l'effort de compression de la table mobile.

Le cycle de soudage est le suivant :

Les extrémités des pièces à souder A et B sont amenées en contact sous pression assez forte, avant de provoquer le passage du courant secondaire de soudage dans les pièces mêmes.

Le circuit électrique secondaire se ferme à travers les résistances ohmiques des parties des pièces dépassant des mâchoires de serrage.

Les pièces à souder offrant une résistance ohmique de loin supérieure à tous les éléments du circuit secondaire deviennent le siège d'un échauffement important, par effet Joule. L'échauffement sera cependant prédominant au joint à cause de la résistance de contact élevée existant en cet endroit et aussi parce que la zone du joint se trouve le plus éloignée des mâchoires (effet refroidissant des mâchoires).

Si l'intensité du courant secondaire est suffisante, la température augmente rapidement et la fusion est atteinte dans la zone du joint.

A ce moment, la résistance mécanique offerte par les pièces à l'effort d'avance de la table mobile diminue. Celle-ci avance, les extrémités en fusion sont refoulées l'une vers l'autre, expulsant le métal fondu. A ce moment, le courant de soudage est interrompu, puis l'effort de compression est annulé. La soudure est réalisée.

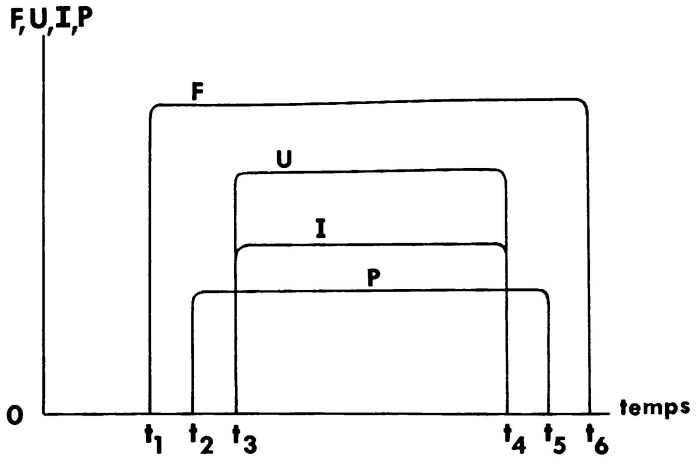


Fig. 343

Graphique de l'intensité du courant de soudage et de l'application de l'effort sur les pièces en fonction du temps dans le cas du soudage en bout par résistance pure.

F : Effort de serrage;
U : Tension électrique secondaire;
I : Intensité du courant secondaire de soudage;
P : Effort de compression sur les faces des pièces à souder, où la soudure doit être réalisée;
$t_2 — t_3$: Temps qui s'écoule entre l'application de l'effort sur les faces à souder et l'enclenchement du courant de soudage;
$t_3 — t_4$: Temps de passage du courant de soudage;
$t_4 — t_5$: Temps qui s'écoule entre la coupure du courant de soudage et l'annulation de l'effort de poussée des pièces l'une vers l'autre.

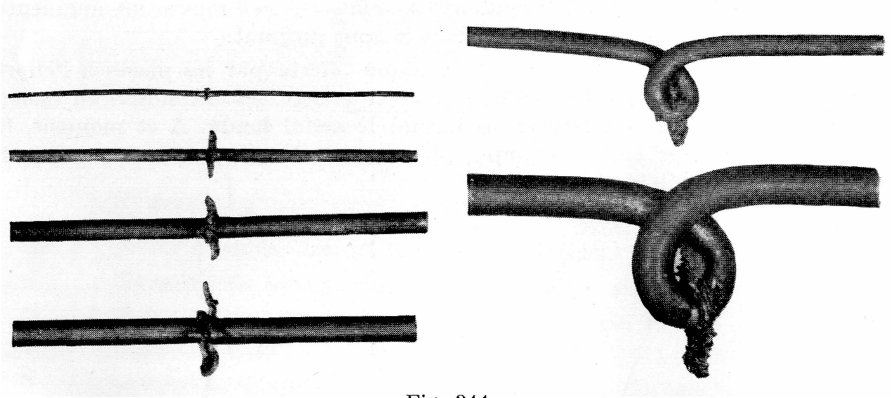


Fig. 344

Fils de cuivre soudés en bout par résistance pure.

La figure 343 donne le graphique de l'intensité du courant de soudage et de l'application de l'effort sur les pièces en fonction du temps dans le cas du soudage en bout par résistance pure.

Les densités de courant de soudage nécessaire sont les suivantes :

Acier doux : 70 à 80 A/mm^2;

Alliages d'aluminium : 150 à 200 A/mm^2;

Cuivre : 250 à 300 A/mm^2.

Les pressions spécifiques sur les surfaces à souder sont habituellement de l'ordre de 0,5 à 1,2 kg/mm^2.

Ce procédé donne lieu à un volume assez important de matière porté à haute température de part et d'autre du joint. La profondeur de chauffe est grande, rendant plastique une grande longueur de métal.

Les faces des pièces à assembler doivent être assez planes et parallèles au plan de soudure afin d'éviter des inclusions d'oxydes.

Ce procédé ne permet pas de souder entre eux des métaux de caractéristiques électriques et physiques différentes.

Le soudage par résistance pure n'est généralement appliqué qu'au soudage de sections faibles de forme massive, comme par exemple, ronds en acier doux, acier dur, acier inoxydable, en alliages d'aluminium, en cuivre. La figure 344 représente des fils en cuivre soudés en bout par résistance pure, tandis que la figure 345 montre une petite machine à souder par résistance pure.

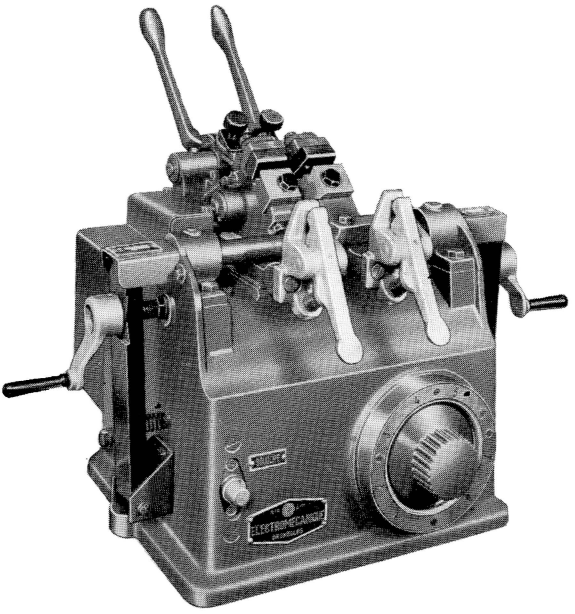
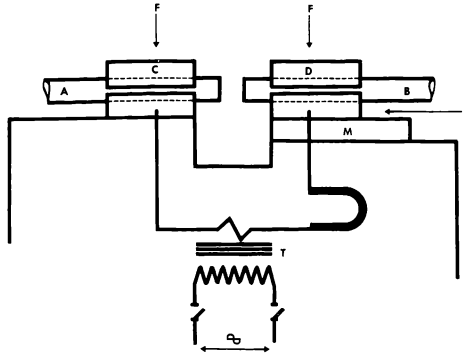


Fig. 345

Machine à souder en bout par résistance pure fils cuivre et fils aluminium.

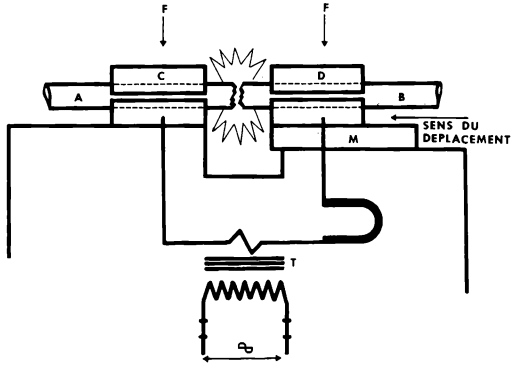
1re phase

A. Serrage et mise sous tension.



2e phase

B. Mise en mouvement lent de la table mobile (Etincelage).



3e phase

C. Mouvement rapide de la table mobile (refoulement au forgeage).

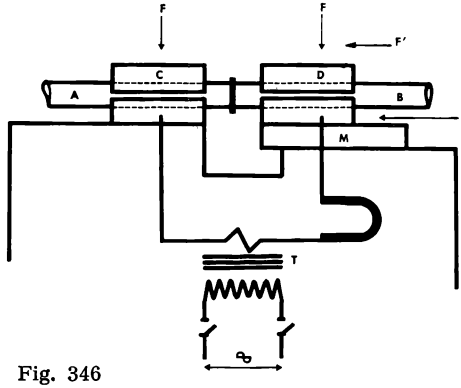


Fig. 346

LE SOUDAGE EN BOUT PAR ÉTINCELAGE

DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Les deux pièces à souder sont serrées chacune dans un dispositif de serrage entre mâchoires (fig. 346).

Ces mâchoires, connectées directement aux bornes du secondaire du transformateur de soudage, assurent la commutation du courant de soudage à chacune des pièces à souder.

Le serrage des pièces entre mors sera suffisant pour assurer une bonne commutation du courant de soudage entre les pièces et ces mors (résistance de contact faible) et empêcher tout glissement des pièces entre mors lorsqu'un effort de refoulement leur est appliqué.

Le dispositif de serrage gauche est fixé sur une table fixe solidaire du bâti de la machine, tandis que le dispositif de serrage droit est fixé sur la table mobile qui se déplace dans l'axe des pièces à souder.

Pour souder par étincelage, les opérations suivantes sont réalisées successivement :

— Serrage des pièces à souder entre les mâchoires. A ce moment, leurs extrémités à assembler ne sont pas en contact, ou sont en contact imparfait sans pression.

— Mise sous tension du transformateur et de ce fait, des pièces à souder.

— Mise en mouvement lent de la table mobile.

— Refoulement ou forgeage après un certain déplacement.

Le processus opératoire est donc tout à fait différent du procédé de soudage par résistance pure (voir fig. 347 à comparer à la fig. 343).

La table mobile étant en mouvement, les faces des pièces entrent en contact sous faible pression. Le circuit électrique secondaire est alors fermé par ces quelques points de contact où la densité de courant est très élevée. Il s'ensuit un dégagement calorifique intense en ces points qui entrent en fusion rapidement. Le phénomène est caractérisé par la projection de particules ou étincelles et s'appelle *l'étincelage*. Il se poursuit pendant toute la durée de l'avance de la table mobile qui maintient en permanence le contact entre faces au fur et à mesure des expulsions de matière.

Quand la course d'étincelage est terminée, les extrémités à assembler ont atteint la température de soudage et sont appliquées fortement l'une contre l'autre grâce à un mouvement rapide de la table mobile. C'est la phase de refoulement ou forgeage. Pendant cette phase, le courant de soudage est coupé. Les mâchoires de serrage sont libérées. La pièce soudée peut être retirée.

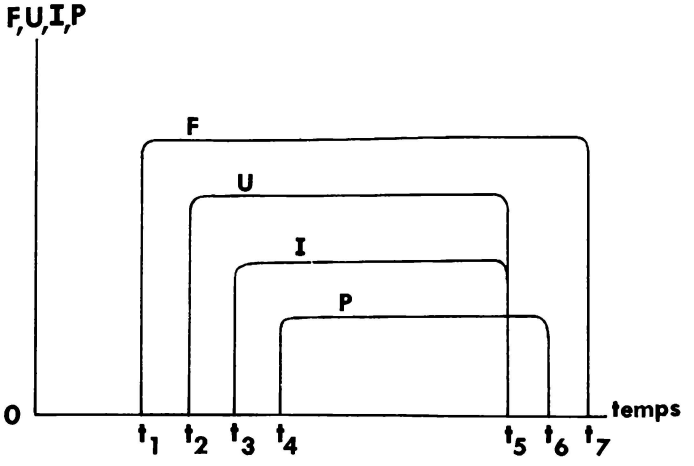


Fig. 347

Soudage en bout par étincelage. Graphique de l'effort de serrage appliqué aux pièces à souder, du mouvement de la table mobile et de la tension électrique appliquée aux pièces, en fonction du temps.

F : Effort de serrage
U : Tension électrique secondaire
I : Intensité du courant secondaire de soudage
P : Effort d'avance appliqué à la table mobile

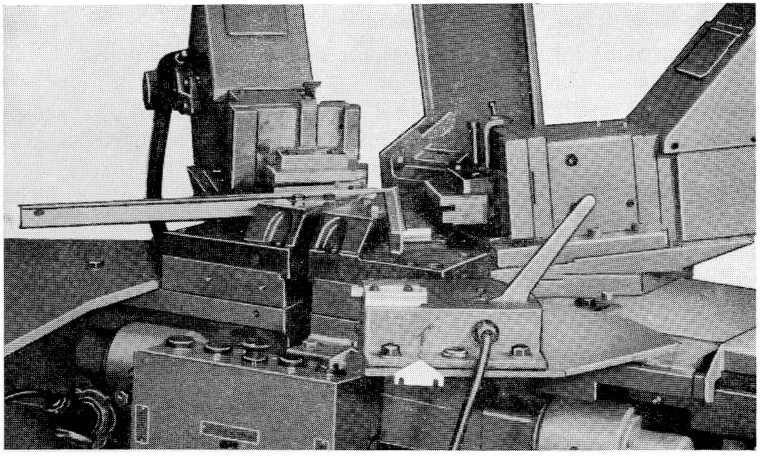


Fig. 348

Pièces placées dans les mors avant étincelage.

L'ÉTINCELAGE

Processus de l'étincelage

Le processus d'échauffement par étincelage est très particulier et diffère du processus d'échauffement par résistance pure.

Une surface métallique n'est jamais tout à fait plane; elle est constituée de crêtes et de creux plus ou moins importants suivant son fini, suivant le mode d'obtention de la surface, le genre d'usinage, sciage, laminage, découpage, tronçonnage, etc. C'est cette rugosité superficielle qui, dans des conditions déterminées, va permettre le phénomène de l'étincelage.

Lors de la mise en mouvement lent de la table mobile, les faces des pièces à souder, sous tension électrique, s'accostent par les aspérités de surface. Le nombre de points de contact et leur surface dépendront de l'état de surface et de la géométrie des faces par rapport à l'axe de poussée de la table mobile (fig. 349 à 356).

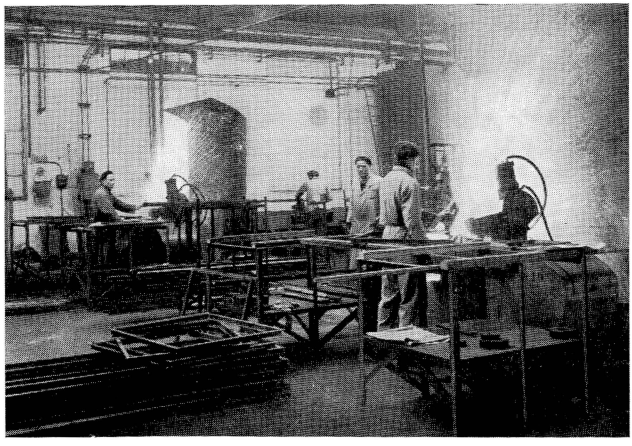


Fig. 349
Atelier d'assemblage de châssis.

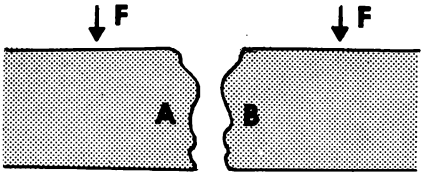


Fig. 350

Démarrage de la table mobile.

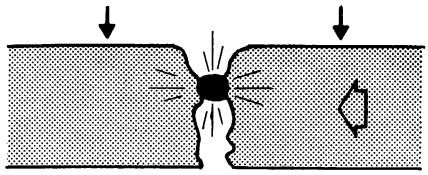


Fig. 351

Deux aspérités entrent en contact et cette zone est portée à la température de fusion.

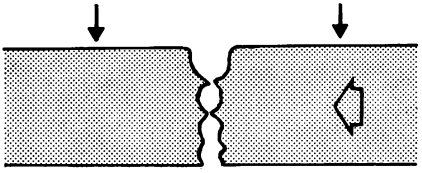


Fig. 352

Des cratères ont été formés par l'expulsion de matière.

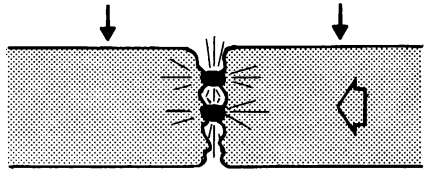


Fig. 353

Les cratères entrent en contact à leur tour.

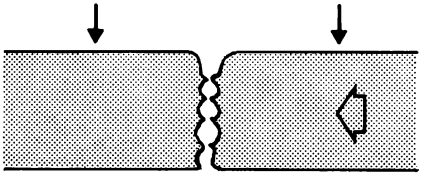


Fig. 354

De nouveaux points de contact ont été formés.

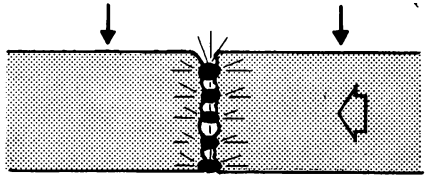


Fig. 355

Accostage et fusion des aspérités qui se multiplient.

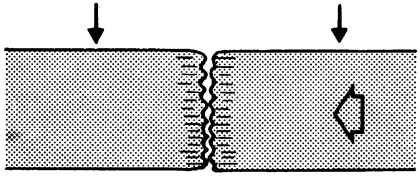


Fig. 356

De proche en proche l'étincelage se généralise sur toute la surface.

Processus de l'étincelage.

Le circuit électrique secondaire se ferme par ces aspérités dont les surfaces de contact ne représentent qu'un faible pourcentage de la section totale des pièces. La pression de contact de ces aspérités étant très faible, la résistance électrique de leur contact sera très élevée. Traversés par un courant intense, ces points de contact sont le siège d'un dégagement calorifique qui les portent presque instantanément à la température de fusion, voire la température de vaporisation. Ces petits volumes de matière en fusion explosent; des particules incandescentes sont projetées vers l'extérieur (fig. 351).

Lors de leur expulsion, ces points de contact donnent naissance à de petits cratères (fig. 352) dont les crêtes vont à leur tour se trouver en contact imparfait, former des ponts de contact métalliques, exploser (fig. 353) et créer de nouveaux cratères (fig. 354). La table continuant son avance, les bords des cratères formés précédemment entrent en contact, sont parcourus par une intensité de courant élevée, atteignent rapidement la température de fusion et explosent (fig. 355); de nouvelles aspérités de surface entrent en contact, et de proche en proche, l'étincelage est généralisé sur toute la surface qui se couvre d'aspérités (fig. 356).

Cette perte de matière par fusion, explosion et combustion, correspond à une diminution de longueur des pièces, compensée par un rapprochement continu de la table mobile pour maintenir automatiquement la pression de contact optimum sur les aspérités qui se renouvellent sans cesse.

Une vitesse trop grande de la table mobile étouffe l'étincelage tandis qu'une vitesse trop faible provoque des arrêts dans le phénomène d'étincelage.

En résumé, *l'étincelage est un chauffage par effet Joule* engendré par le passage d'un courant élevé dans des protubérances métalliques en contact imparfait, fondant, explosant et se renouvelant par la création ininterrompue de cratères sur les faces opposées animées d'un mouvement de translation l'une vers l'autre.

Les tensions secondaires appliquées aux bornes des pièces (de l'ordre de 2 à 15 volts) sont en-dessous du potentiel d'ionisation des gaz de l'atmosphère, et en-dessous du potentiel nécessaire pour produire un arc entre les faces en étincelage.

L'action d'étincelage, grâce à la combustion des particules de métal, à la production de vapeurs métalliques, empêche l'oxydation du métal liquide recouvrant les faces à assembler.

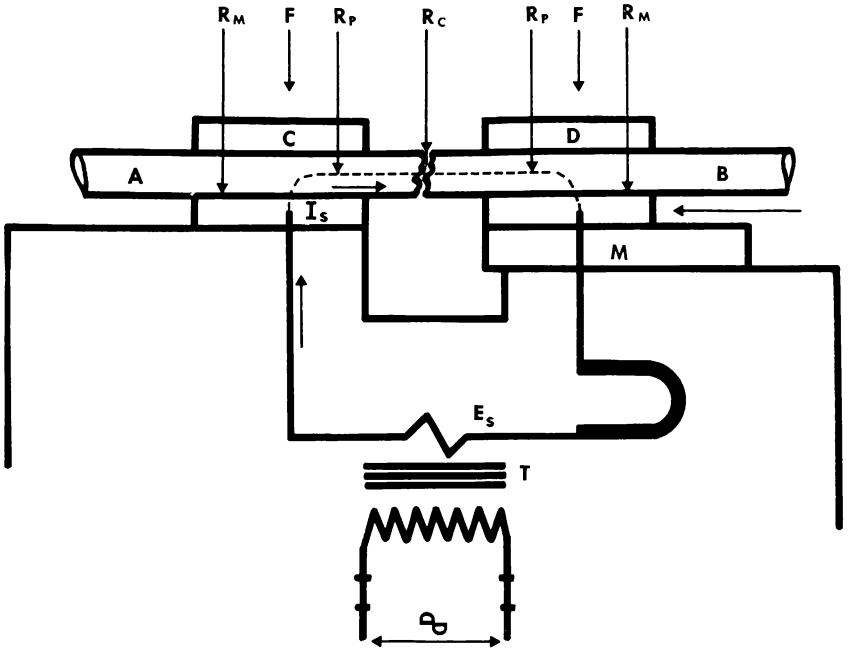


Fig. 357

L'étude du circuit du courant dans les pièces à souder montre que le dégagement calorifique par effet Joule peut avoir comme origine (fig. 357) :

— La résistance de contact aux endroits du serrage des pièces dans les mors : R_M.

La surface de serrage est grande, l'effort de serrage est élevé et la résistance R_M est très faible. Le dégagement de chaleur est négligeable dans cette partie du circuit;

— La résistance ohmique de la matière même dépassant des mors de serrage : R_p. Elle varie suivant le matériau et ses dimensions;

— Les résistances de contact des faces en étincelage : R_c.

La nature de ces résistances de contact d'étincelage a été expliquée. Elles sont de très loin supérieures aux résistances R_M et R_p, et par là, c'est uniquement aux faces en étincelage qu'un dégagement calorifique très intense aura lieu.

De ces observations, il s'ensuit que ce procédé assure la localisation des hautes températures au voisinage immédiat du plan de soudure, que le volume de matière chauffée est beaucoup plus réduit que dans le procédé de soudage par résistance pure.

Lois de l'étincelage

L'action d'étincelage n'est possible que si la puissance débitée par la machine est suffisante pour fondre le métal au fur et à mesure de l'avance de la table mobile. Il faut donc que pendant un temps t, l'énergie fournie par la machine aux faces en étincelage soit supérieure à l'équivalent énergétique de la quantité de chaleur nécessaire à la fusion du métal.

La quantité de chaleur nécessaire pour porter un volume V à la température de fusion est :

$$Q = V.d\,[C_s\,(T - T_0) + C_1] \text{ calories}$$

V = volume en cm^3

d = densité

C_s = chaleur spécifique

C_1 = chaleur latente de fusion

T = température de fusion du métal

T_0 = température initiale du métal.

Le volume V peut être représenté par :

$$V = S.v.t$$

S = section droite des pièces en cm^2

v = vitesse d'avancement de la table mobile en cm/s, supposée constante

t = temps d'avance de la table mobile en secondes

d'où

$$Q = S.v.t.d\,[C_s\,(T - T_0) + C_1] \text{ calories}$$

et l'équivalent d'énergie électrique

$$E = \frac{S.v.t.d\,[C_s\,(T - T_0) + C_1]}{\eta \times 862\,000} \text{ kWh}$$

η étant le rendement de l'opération.

La puissance P nécessaire pour amener le volume V à la fusion dans le temps t s'exprime par :

$$P \geqslant \frac{S.v.d.t\ [C_s\ (T - T_0) + C_1]}{\eta \times 862\,000 \times \dfrac{t}{3\,600}}\ \text{kW}.$$

Négligeons le terme C_1 qui est petit par rapport à $C_s\ (T - T_0)$ pour les métaux et l'expression devient :

$$P \geqslant \frac{S.v.d\ .\ C_s\ (T - T_0)\ 3\,600}{\eta \times 862\,000}$$

C_s et d étant constants pour un métal déterminé et en admettant également que η = Cte, l'expression devient :

$$P \geqslant K.S.v.\ (T - T_0)$$

K = constante pour un métal et une machine donnés.

S = constante pour une pièce donnée.

La puissance P débitée est fonction de la force électromotrice secondaire.

Cette formule donne une relation entre les facteurs principaux d'une opération d'étincelage. Elle montre l'interdépendance de ces facteurs et leurs combinaisons possibles pour assurer une opération d'étincelage correcte :

1) la tension secondaire devra être d'autant plus élevée :

— que la vitesse de la table mobile est élevée;

— que le métal est froid, car plus la valeur de T_0 est basse, plus le terme $(T - T_0)$ est grand;

— que la surface en étincelage est grande.

2) Pour une tension secondaire déterminée et une surface donnée, la vitesse d'étincelage possible sera d'autant plus élevée que la différence $T - T_0$ sera faible, c'est-à-dire, que la vitesse pourra être augmentée progressivement durant l'étincelage puisque la température des zones adjacentes aux faces en étincelage augmente de la température ambiante à une température proche de la fusion.

3) L'amorçage de l'étincelage est plus difficile que son entretien, car au début, la différence $T - T_0$ est maximum puisque T_0 est minimum (pièce à la température ambiante).

Pour satisfaire à l'inégalité ci-dessus, le démarrage de l'étincelage ne pourra se faire que si au moins une des règles suivantes est respectée :

— Donner à la table mobile une vitesse de démarrage très faible et accélérer progressivement;

— Prévoir au démarrage une tension secondaire élevée, puis la diminuer quand l'étincelage est généralisé après une certaine course;

— Diminuer la valeur initiale des surfaces S, à l'aide d'une préparation spéciale des extrémités à souder (fig. 358).

La section complète n'entre en étincelage que progressivement, avec montée graduelle de la température des faces ;

— Diminuer la valeur du terme $T - T_0$ en donnant à T_0 une valeur suffisante grâce à un préchauffage des extrémités; dans ces conditions, l'étincelage pourra démarrer avec une tension secondaire normale et une vitesse d'avance assez élevée.

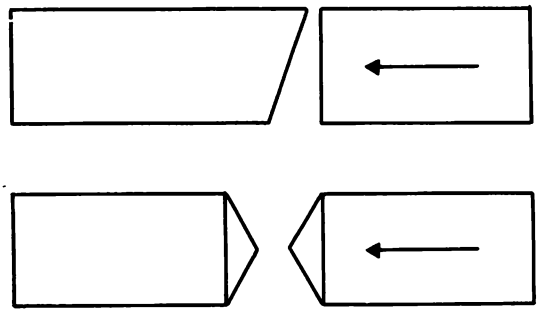


Fig. 358

Préparation spéciale des extrémités à souder pour faciliter le démarrage en étincelage.

LE REFOULEMENT

Après un temps d'étincelage déterminé, lorsque la longueur de matière brûlée est suffisante, les faces à assembler ont atteint la température de soudage et sont recouvertes de métal liquide. La phase de refoulement ou forgeage va succéder à l'opération d'étincelage. A ce moment précis, grâce à un mouvement rapide de la table mobile, les faces à haute température sont fortement comprimées l'une contre l'autre. Les aspérités recouvertes de métal en fusion s'égalisent, pénètrent les unes dans les autres. Les résistances de contact des aspérités s'annulent et le contact a lieu sur la section entière des pièces. L'étincelage est étouffé.

Ce forgeage rapide, pendant lequel la table mobile effectue un nouveau déplacement (course de refoulement) expulse le métal fondu et les oxydes vers l'extérieur et fait apparaître sur la périphérie du joint un bourrelet qui, à sa base, doit être composé de métal sain ayant été refoulé (fig. 359).

Le refoulement doit suivre l'étincelage d'une façon instantanée. Un arrêt de l'étincelage, pendant une fraction de seconde, peut provoquer l'oxydation du métal porté à haute température, ou permettre le refroidissement des faces à forger.

Pendant ce passage critique d'une phase à l'autre, le courant secondaire n'est pas interrompu. Il ne sera coupé que pendant ou après le refoulement total. L'échauffement des pièces en court-circuit pendant le forgeage facilite également l'action de compression.

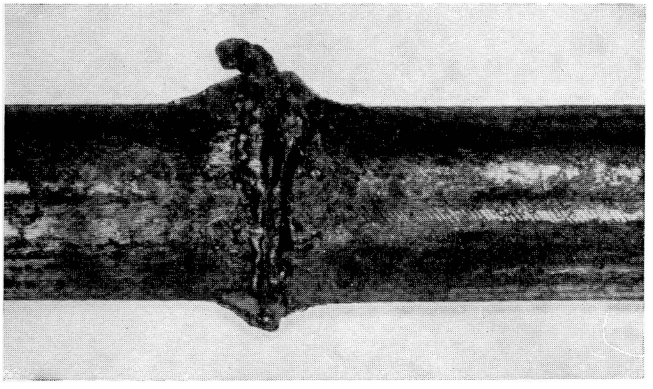


Fig. 359
Aspect d'un bourrelet de refoulement.

ASPECT MÉTALLURGIQUE

Pendant l'opération de soudage, la zone de soudage subit un échauffement progressif, un maintien à haute température, un refroidissement.

Les portions des pièces à souder en contact avec les mâchoires de serrage généralement refroidies par circulation d'eau sont maintenues à une température peu élevée du début à la fin de l'opération de soudage.

D'autre part, l'action d'étincelage a la propriété de localiser le dégagement de calories uniquement aux extrémités à souder et ainsi de limiter la zone portée à haute température à une faible profondeur de part et d'autre du plan de soudure.

Ces conditions expliquent le gradient de température élevé entre la zone de soudure et les mors de serrage et le processus de refroidissement de cette zone.

La figure 360 donne le graphique des températures existant aux divers points d'un rond en acier soudé, immédiatement après le forgeage.

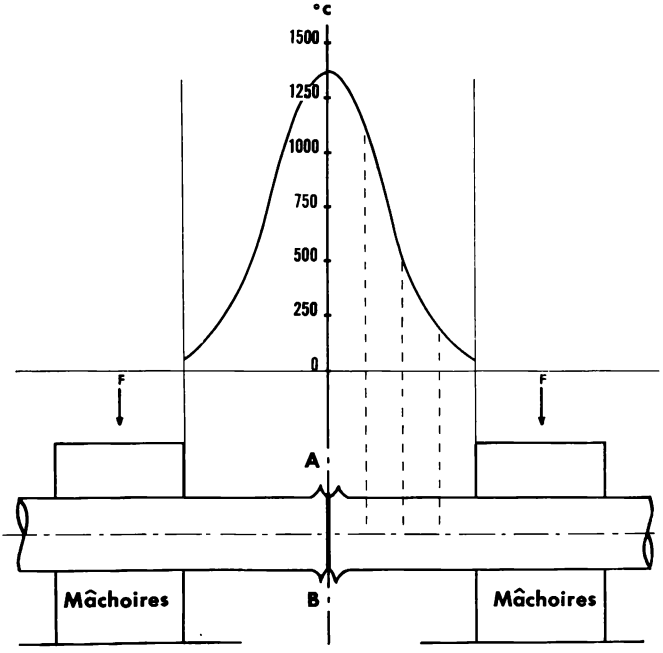


Fig. 360

Graphique des températures existant aux divers points d'un rond en acier doux soudé en bout, immédiatement après le forgeage.

Chacune des zones affectées par le chauffage atteint une température déterminée allant de la température maximum (proche de la température de fusion) au joint soudé, jusqu'à la température ambiante entre mâchoires. A la fin de l'opération, la pièce et les mâchoires absorbent rapidement les calories concentrées au joint qui subit un refroidissement plus ou moins rapide.

La vitesse de refroidissement dépendra :

— de la conductibilité thermique du matériau soudé;
— de la section et de la forme des pièces soudées;
— de la distance entre le plan de soudure et les mâchoires;
— des conditions d'étincelage dont dépend en partie la profondeur de chauffage de part et d'autre du plan de soudure;
— du temps et de l'intensité de chauffage pendant et après le refoulement;
— du temps de serrage des pièces après la fin du forgeage.

La zone soudée subit, en fait, un véritable traitement thermique dont l'influence sur la structure et les propriétés des matériaux soudés, dépendra des caractéristiques physico-chimiques et des traitements préalables de ceux-ci.

Pour les aciers doux, il n'y a pas de problème d'ordre métallurgique; la structure, la dureté, les résistances mécaniques ne subissent que des modifications négligeables et les propriétés du joint sont identiques à celles du métal de base. Dans le cas de l'acier doux laminé à froid, on peut observer une légère diminution de la dureté dans la zone de soudure, à cause de la réduction par chauffage de la dureté résultant de l'écrouissage du métal de base lors du laminage.

La structure d'une soudure par étincelage est celle d'un métal forgé, exempt d'oxydes et de métal fondu (fig. 361).

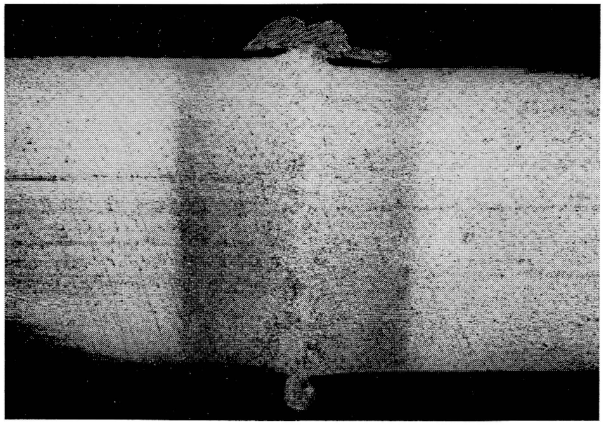


Fig. 361
Macrographie d'une soudure en bout par étincelage. Acier doux.

La modification de structure pouvant résulter du soudage par étincelage est le changement d'orientation des fibres produit durant l'action de forgeage.

Si le métal de base contient des inclusions importantes et en ligne la réorientation des fibres par refoulement peut être défavorable à la résistance mécanique de la zone soudée (fig. 362 et 363).

Les lignes d'inclusions refoulées vers l'extérieur peuvent former des lignes de faiblesse et faire apparaître des fissures extérieures lors d'un emboutissage ou d'un pliage ultérieur.

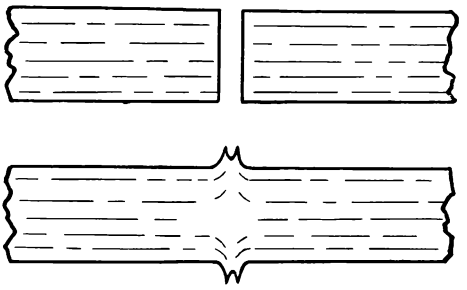


Fig. 362

Changement d'orientation des lignes d'inclusion lors du refoulement.

Pour les aciers au carbone et les aciers alliés, leurs caractéristiques physiques et leur composition chimique détermineront leur comportement à haute température ainsi que leur aptitude à la trempe.

La partie chauffée pourra présenter des zones trempées avec diminution de la résilience et augmentation de la dureté.

Si la vitesse critique de trempe est dépassée, on pourra voir apparaître de la troostite, ou de la martensite.

Pour les aciers très durs, l'effet de refroidissement peut donner lieu à des criques et des tapures.

La formation de celles-ci sera empêchée en réduisant la vitesse de refroidissement après soudage, par application d'un préchauffage ou d'un post-chauffage sur la machine même.

Pour les aciers à haute teneur en carbone et les aciers alliés spéciaux, si les exigences de qualité de soudure sont sévères, la restauration des caractéristiques physiques désirées doit se faire par traitement thermique correct après soudage, à l'aide d'une installation prévue à cet effet (four, etc.).

Les aciers faiblement alliés ou à teneur moyenne en carbone (jusqu'à environ 0,4 %) ne nécessitent que quelques précautions spéciales pour obtenir une structure correcte :

— Choix judicieux des paramètres de soudage pour augmenter la profondeur de chauffe;

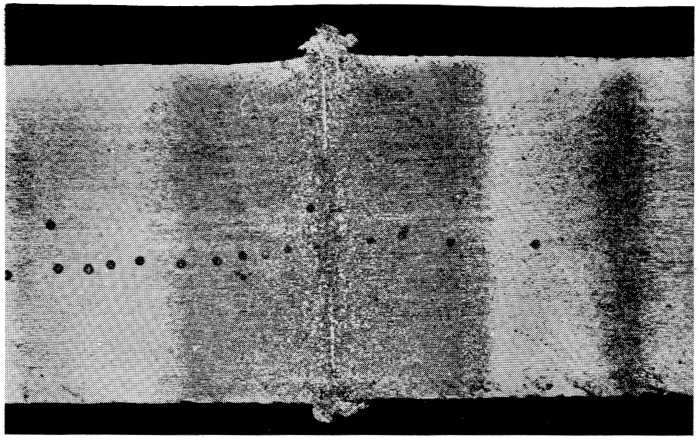
— Diminution de la vitesse de refroidissement à l'aide d'un post-chauffage (ou refroidissement contrôlé);

— Diminution du temps de serrage des pièces après forgeage.

Fig. 363

Macrographie d'une soudure en bout montrant l'orientation des lignes d'inclusion résultant du forgeage.

La figure 364 donne les variations de dureté dans un acier au Cr — Ni — Mo en rond ∅ 25 mm (d'après R.W.M.A.). De chaque côté de la ligne de soudure, des portions de pièce ont été portées à une température suffisante pour provoquer la trempe au refroidissement. La dureté la plus basse se trouve à côté de la fin de la zone affectée par la chaleur (A et B) où la température était légèrement supérieure à la température de recuit du métal de base. La chute de dureté à la ligne de soudure est due à la décarburation.



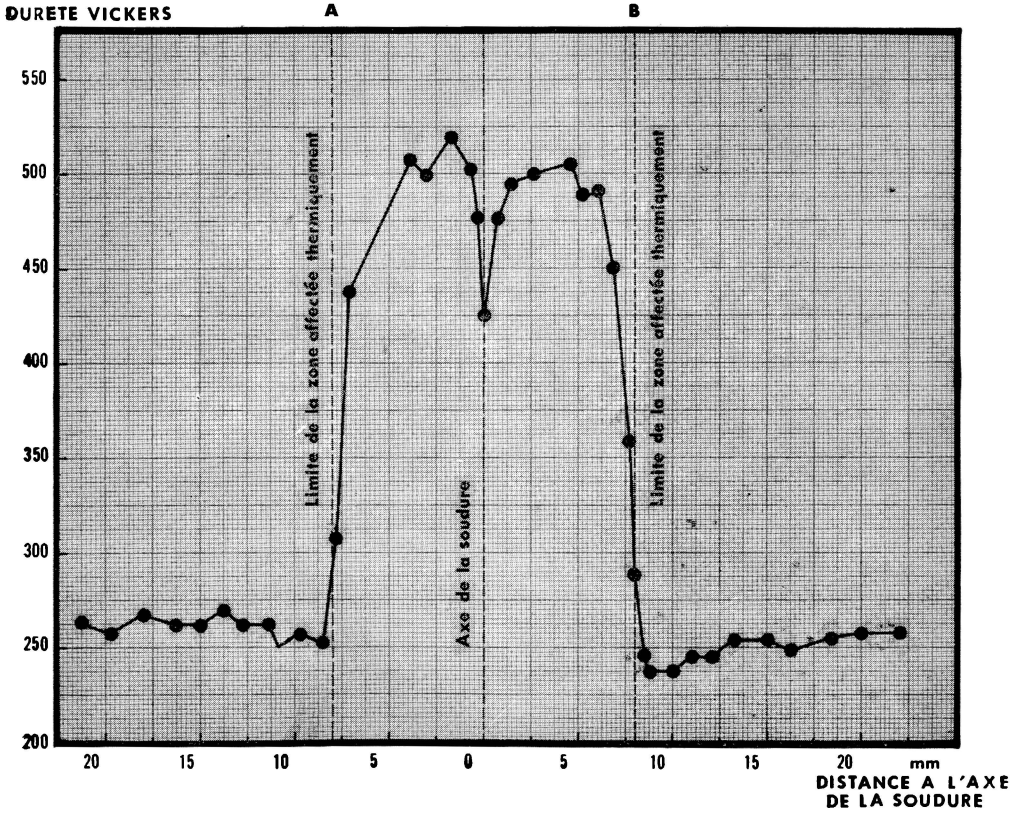


Fig. 364
Variations de dureté dans la zone de soudure d'un acier au Cr - Ni - Mo.

LES PARAMÈTRES DU SOUDAGE EN BOUT PAR ÉTINCELAGE

Le présent chapitre étudie les lois de réglage d'une machine, la détermination des valeurs à donner aux divers paramètres de soudage par étincelage.

Ces valeurs dépendent :

1) Des caractéristiques chimiques, électriques, mécaniques et métallurgiques des matériaux.

2) De la forme géométrique de la section à souder, et de sa surface.

Les pièces à assembler se présentent sous l'une des formes suivantes :

a) pièces massives : ronds, carrés, etc.,
Exemple : rails de chemin de fer, fers à béton;

b) sections à parois minces : tôles, feuillards plans, cintrés ou emboutis, tubes, etc., c'est-à-dire, tous les cas où l'épaisseur des parois est faible par rapport aux autres dimensions de la section à souder.
Exemple : profilés pour menuiserie métallique, jantes de roues.

Chacun des deux groupes obéit à des règles de soudage bien distinctes.

La dispersion de chaleur, les surfaces de contact avec l'air ambiant, l'expulsion des oxydes sont différentes d'un cas à l'autre.

Le réglage d'une machine en vue d'une application déterminée consiste à reporter sur les dispositifs de réglage les valeurs des paramètres suivants, particulièrement nombreux en soudage par étincelage :

Variables électriques :

— Tension secondaire appliquée aux pièces à souder;
— Intensité du courant secondaire de soudage :
pendant l'étincelage,
pendant le refoulement.

Variables géométriques :

— Course totale de soudage qui comprend :
la course d'étincelage,
la course de refoulement.
— Distances initiale et finale entre mors de serrage.

Variables de temps :

— Vitesse et accélération d'étincelage (ou temps d'étincelage);
— Vitesse de refoulement;
— Durée de passage du courant pendant le refoulement.

Variables mécaniques :

— Effort de refoulement (ou de forgeage);
— Effort de serrage des pièces entre mors.

TENSION ET INTENSITÉ SECONDAIRES D'ÉTINCELAGE

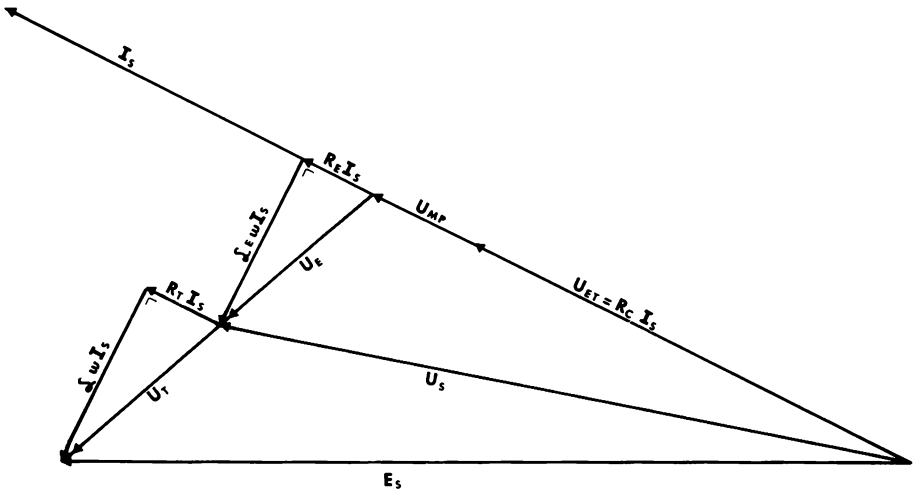


Fig. 365

Diagramme de Kapp du circuit secondaire.

E_s : Force électromotrice engendrée dans le circuit secondaire

I_s : Intensité du courant traversant les pièces à souder

R_c : Résistance de contact d'étincelage aux faces des pièces à souder

U_{Et} : Tension aux faces en étincelage

U_{MP} : Chute de tension ohmique dans les pièces à souder jusqu'aux faces en étincelage

R_E : Résistance ohmique des connexions secondaires du transformateur aux mâchoires de commutation du courant aux pièces à souder

$L_E \omega$: Réactance du circuit secondaire extérieur

U_E : Chute de tension dans le circuit secondaire extérieur

R_T : Résistance ohmique du secondaire du transformateur

$L_T \omega$: Réactance du secondaire du transformateur

U_T : Chute de tension dans le transformateur.

On a : $$I_s = \frac{E_s}{Z}$$

Z : Impédance totale du circuit secondaire du transformateur même et du circuit secondaire extérieur dans lequel se trouvent les pièces à souder.

$$\overline{E_s} = \overline{R_T I_s} + \overline{L_T \omega I_s} + \overline{R_E I_s} + \overline{L_E \omega I_s} + \overline{(2 R_M + 2 R_P) I_s} + \overline{R_c I_s}$$

R_M : résistance de contact « mâchoire — pièce à souder »

R_P : résistance ohmique de chacune des portions des pièces à souder traversées par le courant de soudage.

$\overline{(2 R_M + 2 R_P) I_s} = \overline{U_{MP}}$: chute de tension ohmique dans les pièces à souder jusqu'aux faces en étincelage

$\overline{R_T I_s} + \overline{L_T \omega I_s} = \overline{U_T}$: chute de tension dans le transformateur

$\overline{R_E I_s} + \overline{L_E \omega I_s} = \overline{U_E}$: chute de tension dans le circuit secondaire extérieur

$\overline{R_c . I_s} = \overline{U_{Et}}$: tension aux faces en étincelage.

$$\overline{U_{Et}} = \overline{R_c . I_s} = \overline{E_s} - \overline{U_T} - \overline{U_E} - \overline{U_{MP}}.$$

La force électromotrice E_s devra être suffisante pour assurer aux faces en étincelage une tension $U_{Et} = R_c . I_s$ suffisante et ainsi assurer une valeur déterminée au courant d'étincelage I_s, compte tenu des diverses chutes de tension dans le circuit secondaire.

Pour des transformateurs et circuits normaux, les chutes de tension U_T, U_E et U_{MP} sont faibles par rapport à la chute de tension U_{Et} dans les faces en étincelage. Celle-ci peut atteindre 70 à 90 % de la force électromotrice secondaire E_s. La puissance d'étincelage est égale à :

$$P_{Et} = R_c . I^2_s = \frac{U^2_{Et}}{R_c}$$

R_c étant inversement proportionnel à la section, on peut écrire :

$$P_{Et} = K_1 . U^2_{Et} . S.$$

Or, on sait que, du début à la fin de l'action d'étincelage, l'inégalité suivante doit être satisfaite :

$$K_1 . U^2_{Et} . S \geqslant K . S . v (T - T_0)$$

soit

$$U^2_{Et} \geqslant K_2 . v (T - T_0)$$

c'est-à-dire qu'à une puissance d'étincelage, fonction de la tension secondaire, correspondra une vitesse d'étincelage maximum, pour un matériau donné.

Il n'est pas suffisant d'observer cette règle pour obtenir l'étincelage, car on ne peut pas indéfiniment diminuer le courant d'étincelage et la vitesse d'étincelage. En effet, si l'intensité de courant I_s est trop faible, quelle que soit la valeur de R_c et la valeur de la vitesse, les calories dégagées entre les faces en contact à chaque instant sont diffusées dans les pièces et les mâchoires au fur et à mesure de leur production. Un équilibre thermique s'établit à une température inférieure au point de fusion du métal. Les aspérités ne sont pas portées à la fusion et arrivent en contact sous plus forte pression, la table continuant son mouvement d'avance. La résistance de contact et la densité de courant d'étincelage diminuent encore. L'étincelage n'est pas possible.

Si l'on augmente progressivement I_s en agissant sur la valeur de E_s, il arrive qu'à un moment donné et pour une faible valeur de la vitesse, l'intensité du courant d'étincelage soit suffisante pour porter à la fusion les aspérités en contact.

Le phénomène d'étincelage se produit, il y a fusion et expulsion de particules métalliques et un nouvel équilibre thermique s'établit à une température supérieure à la température obtenue dans le premier cas, mais inférieure à la température de fusion. Quelle que soit la durée de l'étincelage, les faces à assembler n'atteignent pas la température de soudage.

La quantité de calories emportées par les particules de métal et la quantité de calories dissipées par conduction dans les pièces mêmes, dans les mâchoires et par rayonnement, sont trop importantes par rapport aux calories utiles qui restent concentrées dans la zone du joint.

Il faut donc que le dégagement calorifique par effet Joule d'étincelage aux faces, soit de loin supérieur à ces diverses pertes, afin que les faces en étincelage s'échauffent graduellement et se recouvrent de façon permanente d'une couche de métal liquide.

Il existe donc pour chaque matériau *une densité de courant minimum en dessous de laquelle le procédé n'est pas possible.* A cette densité minimum correspond une vitesse minimum d'étincelage.

D'une façon générale, l'intensité du courant d'étincelage dépendra :

— des caractéristiques des matériaux à souder : résistivité, conductibilité thermique, chaleur spécifique, etc. ;

— de la section à souder ;

— de la distance entre mâchoires ;

— de la forme des pièces par le refroidissement plus ou moins intense qu'elle peut entraîner ;

— de la vitesse d'étincelage qui, dans certains cas, est imposée par les caractéristiques mêmes des matériaux à souder, par exemple, la conductibilité thermique des alliages d'aluminium qui impose une vitesse d'étincelage très élevée.

S'il existe une limite inférieure pour l'intensité de courant et la tension d'étincelage, il existe également une limite supérieure pour ces valeurs. En effet, des tensions secondaires exagérées peuvent provoquer la brûlure complète des pièces ou, tout au moins, donner lieu à des cratères trop profonds lors de la fusion des aspérités en contact. Ces cratères, qu'il est difficile de combler lors du refoulement, risquent de s'oxyder et de faire apparaître des trous et des porosités dans la soudure. D'après « Warren et Savage », les observations suivantes ont été faites :

En soudage par étincelage d'une pièce donnée avec une tension secondaire égale à 3,93 V, la profondeur maximum des cratères était de 0,66 mm, tandis que dans les mêmes conditions, mais avec une tension secondaire égale à 5,24 V, la profondeur maximum des cratères était de 1,32 mm.

La meilleure façon de procéder est d'utiliser une tension relativement élevée pour le démarrage en étincelage et de réduire cette tension à une valeur plus faible après un certain temps d'étincelage ($T - T_0$), ayant à ce moment une valeur plus faible, et les surfaces étant tapissées d'aspérités.

Les tensions secondaires normalement utilisées varient de 2 à 15 volts.

Les densités de courant secondaire d'étincelage couramment utilisées sont les suivantes :

Aciers : 5 à 10 A/mm^2 ;

Alliages d'aluminium : 15 à 30 A/mm^2.

INTENSITÉ - TEMPS DE SOUDAGE

La courbe de l'intensité a l'allure représentée à la figure 366.

Le temps d'étincelage est de l'ordre de plusieurs secondes, alors que le temps de refoulement n'est que de l'ordre de quelques périodes.

Pendant l'étincelage, la courbe est très irrégulière par suite des court-circuits successifs des aspérités.

On constate que l'intensité moyenne a tendance à augmenter suite à la réduction de longueur des pièces due à l'étincelage et surtout à cause de la diminution de la résistance de contact totale.

En général, on peut dire que I moyen = 0,20 à 0,30 I max. lors du refoulement.

Pour les calculs des sections de câbles et de la puissance de raccordement, on tiendra compte d'une intensité égale à 0,5 I max. refoulement.

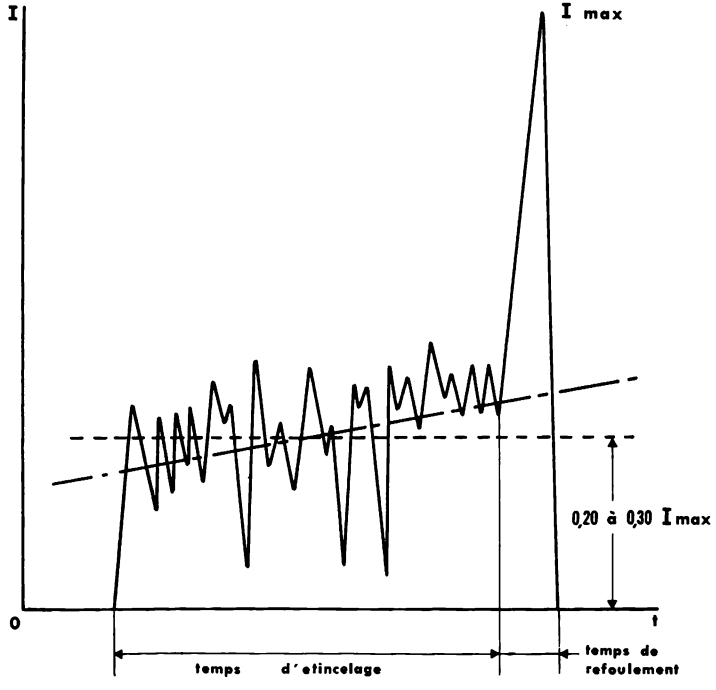


Fig. 366

Oscillogramme du courant d'une soudure en bout par étincelage.

INTENSITÉ DU COURANT AU REFOULEMENT

Pendant le forgeage, les résistances de contact des faces en étincelage sont annulées. De ce fait, l'impédance du circuit secondaire diminue fortement, l'intensité du courant secondaire augmente automatiquement et prend des valeurs égales à 3 à 5 fois l'intensité du courant moyen d'étincelage, suivant les caractéristiques du transformateur et des matériaux.

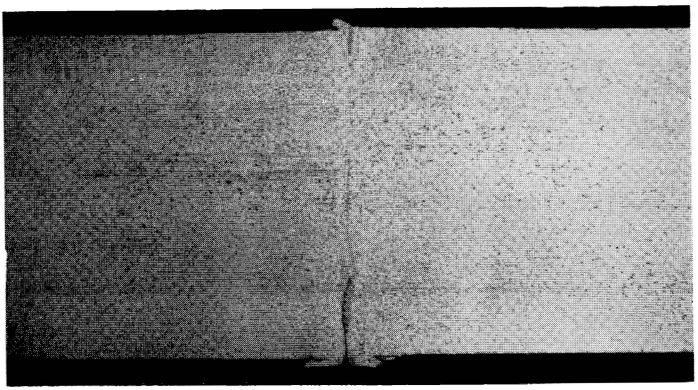


Fig. 367
Macrographie d'une soudure en bout surchauffée.

Dans certains cas, la tension secondaire est diminuée automatiquement au début du forgeage, par exemple dans le cas de pièces de faible section afin d'éviter des brûlures ou de la surchauffe (fig. 367).

Les densités de courant au refoulement normalement utilisées sont les suivantes :

Aciers : 18 à 30 A/mm^2.

Alliages d'aluminium : 130 à 300 A/mm^2.

Ces données peuvent servir de base de réglage. Comme elles dépendent elles-mêmes des valeurs données à d'autres variables, comme par exemple, vitesse d'étincelage, on conçoit qu'elles peuvent varier entre des limites assez larges.

COURSES DE SOUDAGE

Course totale de soudage : c'est la longueur totale de matière perdue (brûlée et refoulée) pour les deux pièces assemblées au cours de l'opération complète de soudage en bout. Elle est égale à la course d'étincelage plus la course de refoulement (fig. 368).

Course d'étincelage : c'est la longueur de matière perdue pour les deux pièces pendant l'action d'étincelage (fig. 368).

Course de refoulement : c'est la longueur de matière perdue pour les deux pièces pendant le forgeage (fig. 368).

a. Début de l'étincelage

b. Fin de l'étincelage
Début du refoulement

c. Fin du refoulement

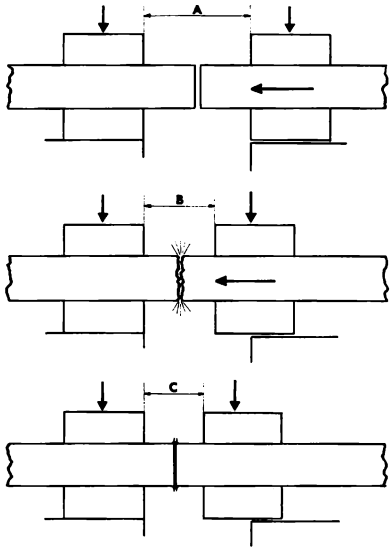


Fig. 368

Courses de soudage. Distances finale et initiale entre mors

A : Ecartement initial entre mors de serrage.
B : Ecartement entre mors à la fin de l'étincelage
C : Ecartement final entre mors de serrage

A — C : Course totale de soudage

A — B : Course d'étincelage pour les deux pièces, soit $\frac{A-B}{2}$ pour chacune des pièces à souder

B — C : Course de refoulement pour les deux pièces, soit $\frac{B-C}{2}$ pour chacune des pièces à souder.

Course d'étincelage

Pour un matériau donné, de section déterminée, le nombre de calories dégagées aux faces en étincelage dépend de la longueur de matière brûlée, car cette longueur conditionne le volume de métal porté à l'état de fusion.

La course d'étincelage doit assurer une profondeur de chauffe suffisante et l'établissement de la température de fusion stable et généralisée sur toute la surface.

La longueur a donner à la course d'étincelage dépend :

— des caractéristiques du matériau à souder mais surtout de sa conductibilité thermique;

— du mouvement de la table (mouvement uniforme, mouvement uniformément accéléré, etc.);

— de la section ou de l'épaisseur des pièces à souder;

— de la distance entre mâchoires qui conditionne en partie le rendement thermique de l'action d'étincelage. Notons que les caractéristiques de certains matériaux ou l'épaisseur peuvent imposer la valeur de la distance entre mâchoires;

— du temps d'étincelage.

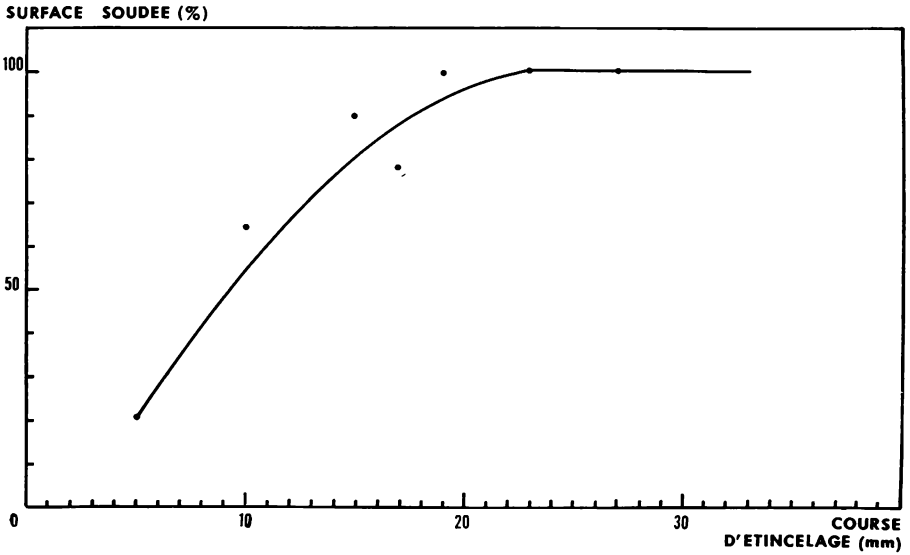


Fig. 369

Qualité de la soudure en fonction de la course d'étincelage Plat AG3, épaisseur 2 mm

Des courses d'étincelage insuffisantes donnent lieu à une élévation de température trop faible et après le refoulement, le plan du joint contient des zones oxydées, poreuses, collées, de faible résistance mécanique. Des courses d'étincelage exagérées augmentent inutilement la perte de matière.

Les valeurs à donner aux courses d'étincelage ont été déterminées expérimentalement pour divers matériaux en tenant compte de leurs caractéristiques spécifiques.

Le graphique figure 369 montre les résultats d'essais expérimentaux réalisés sur méplats, en alliage d'aluminium type AG 3, épaisseur 2 mm.

Les critères de qualité étaient les essais de traction sur éprouvettes soudées et le pourcentage de surface soudée d'une façon saine, c'est-à-dire, sans oxyde, sans porosités, sans partie froide, par rapport à la section totale à assembler. Le graphique montre nettement que ce n'est qu'à partir d'une *course d'étincelage minimum* que la qualité de soudure est bonne sur toute la surface du joint.

Les valeurs suivantes pourront être prises comme base de détermination de la course d'étincelage.

Aciers doux :

— *Sections massives :* ronds, carrés, hexagones, etc., course d'étincelage = 0,5 à 0,6 × D mm, D étant le diamètre de la pièce à souder. Pour d'autres formes géométriques massives, il faut donc ramener la section de la pièce à souder à celle d'un cercle de diamètre équivalent D;

— *Sections à parois minces :*

Course étincelage = 3,5 à 5 × e mm, e étant l'épaisseur des pièces à souder.

Alliages d'aluminium :

— *Sections à parois minces :*

Course étincelage = 7 à 11 × e mm, e étant l'épaisseur de la pièce à souder.

On voit donc que les alliages d'aluminium qui ont une conductibilité thermique 3 à 5 fois plus forte que les aciers doux, nécessitent des courses d'étincelage doubles de celles utilisées pour les aciers de mêmes épaisseurs.

Course de refoulement ou de forgeage

La course de refoulement ou de forgeage doit être suffisante pour expulser les oxydes et le métal fondu et surchauffé de tous les points des surfaces à souder pour amener les faces à un contact intime sur métal sain, sans porosités.

On sait qu'à la fin de l'étincelage, les surfaces sont tapissées de cratères recouverts de métal en fusion, et atteignant une certaine profondeur. La longueur refoulée devra être nettement supérieure à la profondeur de ces cratères. Elle sera fonction de la section pour le cas des pièces massives et de l'épaisseur dans le cas des pièces à parois minces. Des courses de refoulement excessives donnent naissance à des bourrelets extérieurs importants, peuvent déformer le métal à froid, créer des criques, décoller les lignes d'inclusions.

Les graphiques (fig. 370 - 371) établis expérimentalement montrent l'influence de la course de refoulement sur la qualité de soudure, dans le cas de méplats en alliage d'aluminium AG 3.

Les données suivantes pourront être prises comme bases pour la détermination des courses de refoulement :

Aciers doux :

— *Sections massives :*

Course refoulement = 0,15 à 0,25 D, D étant le diamètre de la pièce à souder. Pour d'autres formes géométriques massives, il faut ramener la section de la pièce à souder à celle d'un cercle de diamètre équivalent D.

— *Sections à parois minces :*

Course refoulement = 0,8 à 1,5 $\times$ e, e étant l'épaisseur des pièces à souder.

Aciers spéciaux et réfractaires :

— *Sections à parois minces :*

Course refoulement = 1 à 2 $\times$ e, e étant l'épaisseur.

D'une façon générale, les matériaux dont la composition donne lieu à la formation d'oxydes réfractaires ou de nitrites par réaction chimique avec gaz atmosphériques requièrent normalement des courses de refoulement plus longues.

Alliages d'aluminium :

— *Sections à parois minces.*

Le graphique de la figure 372 donne des courses de refoulement à admettre en fonction de l'épaisseur.

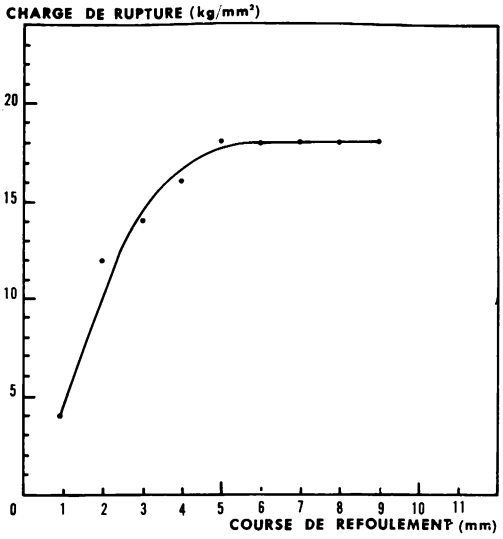


Fig. 370

Charge de rupture d'une éprouvette soudée en bout par étincelage en fonction de la course de refoulement - Flats en alliage d'aluminium AG3 - Epaisseur 3 mm.

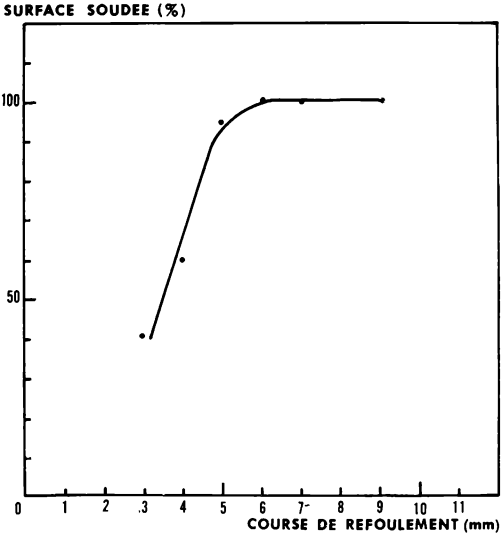


Fig. 371

Influence de la course de refoulement sur là qualité d'une soudure en bout par étincelage. Plats en alliage d'aluminium AG3. Epaisseur 3 mm.

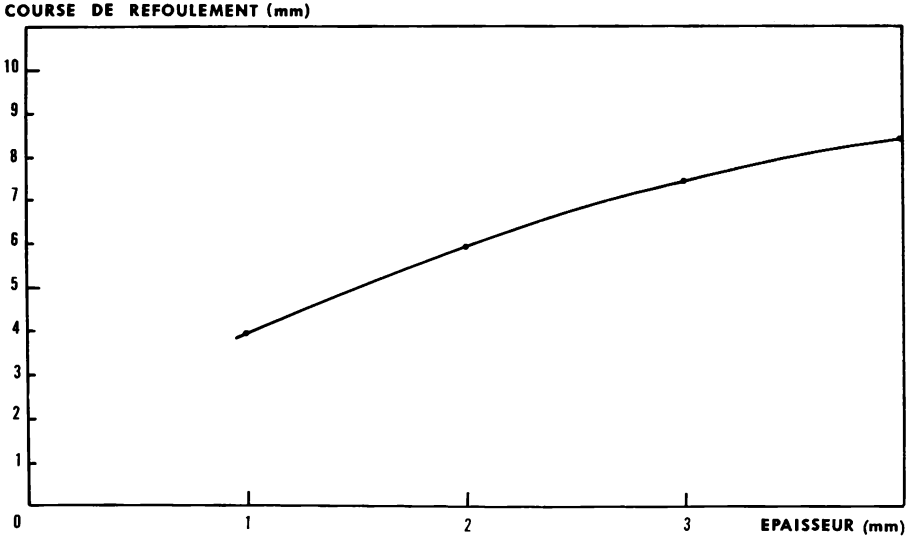


Fig. 372

Courses de refoulement à admettre en fonction de l'épaisseur pour section à parois minces d'alliage d'aluminium.

Course totale de soudage

Les graphiques (fig. 373 - 374 - 375) donnent les courses totales de soudage, c'est-à-dire, course d'étincelage plus course de refoulement pour les aciers et alliages d'aluminium :

Fig. 373 — sections massives aciers doux.

Fig. 374 — sections à parois minces, aciers doux.

Fig. 375 — sections à parois minces, alliages d'aluminium.

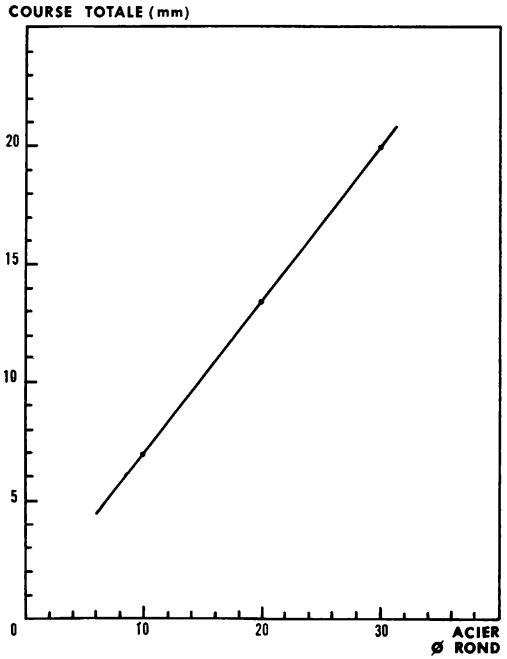


Fig. 373

Course totale de soudage en fonction de la section à souder - Sections massives acier doux.

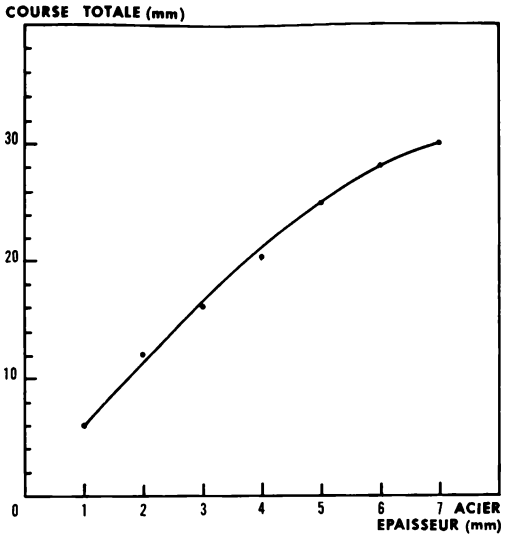


Fig. 374

Course totale de soudage en fonction de l'épaisseur des pièces à souder - Acier doux.

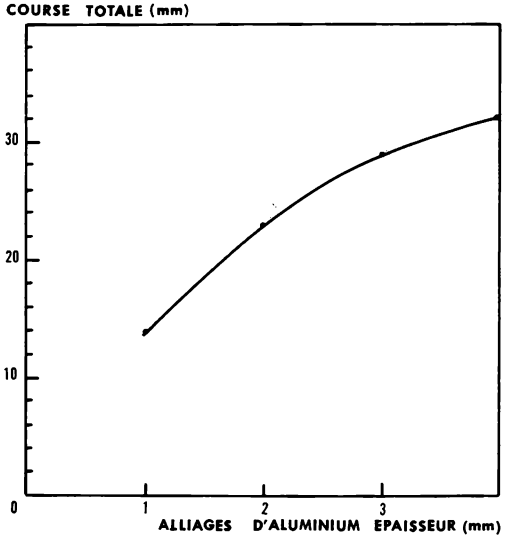


Fig. 375

Course totale de soudage en fonction de l'épaisseur des pièces à souder - Alliages d'aluminium.

ÉCARTEMENT INITIAL ET FINAL ENTRE MORS

(fig. 368, page 384)

Ecartement initial entre mors : la distance entre les faces intérieures des mors de serrage au début de l'opération d'étincelage. C'est la somme de la course d'étincelage, de la course de refoulement, et de l'écartement final des mors.

Ecartement final entre mors : la distance entre les faces intérieures des mors de serrage à la fin de l'opération totale de soudage, c'est-à-dire, lorsque la course de refoulement est accomplie, les pièces étant sous pression de serrage.

Ces écartements conditionnent la distance entre les faces en étincelage à haute température et les mors, généralement refroidis par circulation d'eau, et donc déterminent en partie le gradient de température.

Les pertes de calories par conduction sont d'autant plus importantes que ces distances sont faibles.

A la fin de l'opération d'étincelage et pendant l'opération de forgeage, l'écartement final entre mors aura un effet marqué sur la vitesse de refroidissement du plan et de la zone de soudure. Pour les aciers trempants, et dans tous les cas où un refroidissement brutal est à déconseiller, il faudra choisir des distances finales les plus élevées possible.

Cependant, une distance finale trop importante peut donner lieu à un forgeage médiocre, à un bourrelet trop important et favoriser la déformation et le chevauchement des pièces.

Un écartement final trop faible s'oppose à la formation normale du bourrelet sur lequel viennent buter les mâchoires, empêchant ainsi la concentration de l'effort de forgeage à la section à souder.

Les valeurs recommandées pour l'écartement final sont les suivantes :

Aciers doux :

— *Sections massives :*

Écartement final = 1 à 1,2 × D, D étant le diamètre de la pièce à souder. Pour d'autres formes géométriques massives, il faut ramener la section de la pièce à souder à celle d'un cercle de diamètre équivalent D.

— *Sections à parois minces :*

Ecartement final = 3 à 6 × e, e étant l'épaisseur des pièces à souder.

Alliages d'aluminium :

— *Sections à parois minces :*

Ecartement final = 0,5 à 1 × e, e étant l'épaisseur des pièces à souder.

TEMPS ET VITESSE D'ÉTINCELAGE

Temps d'étincelage : temps qui s'écoule pendant l'opération d'étincelage.

Vitesse d'étincelage : c'est la vitesse de la table mobile pendant l'opération d'étincelage. C'est le nombre de mm de longueur de matière brûlée par seconde.

Le temps d'étincelage dépend :

— des caractéristiques du matériau à souder, surtout de sa conductibilité thermique,

— de la section ou de l'épaisseur du matériau à souder,

— de la course d'étincelage choisie,

— de la tension secondaire et de la puissance disponibles.

Il est évident que plus grande est la conductibilité thermique du matériau, plus le temps d'étincelage devra être court afin que les calories dégagées aux faces en étincelage y restent concentrées.

Du début à la fin de l'action d'étincelage, l'inégalité suivante doit être satisfaite :

$$U^2_{Et} \geqslant K_2 . v\ (T - T_0)$$ (voir étude de l'étincelage).

La vitesse d'étincelage est donc dépendante de la tension secondaire et de la température des faces en étincelage.

Au début, la vitesse d'étincelage est lente et constante afin de faciliter l'amorçage de l'étincelage sur pièces froides (la valeur $T - T_0$ est maximum) et dont les faces ne présentent que peu d'aspérités.

Au fur et à mesure que l'étincelage avance, la température des faces s'élève, le temps de fusion et d'explosion des aspérités en contact diminue, la quantité de matière brûlée est plus forte et il est nécessaire d'accélérer le mouvement de la table mobile.

La vitesse sera toujours suffisante pour assurer un étincelage continu.

Des arrêts d'étincelage permettent l'oxydation des faces à haute température et des déperditions de chaleur.

Une vitesse trop élevée pour la tension secondaire disponible peut étouffer l'étincelage et rendre l'opération impossible.

Un mouvement de la table mobile avec accélération constante donne les meilleurs résultats.

Les données suivantes peuvent servir comme base de vitesses d'étincelage. Il s'agit évidemment de vitesses moyennes :

Fig. 376 — Temps d'étincelage en secondes en fonction du diamètre de ronds en acier doux à souder, ou toute section massive.

Fig. 377 — Temps d'étincelage en secondes en fonction de l'épaisseur des pièces à souder. Acier doux.

Fig. 378 — Temps d'étincelage en secondes en fonction de l'épaisseur des pièces à souder. Alliages d'aluminium.

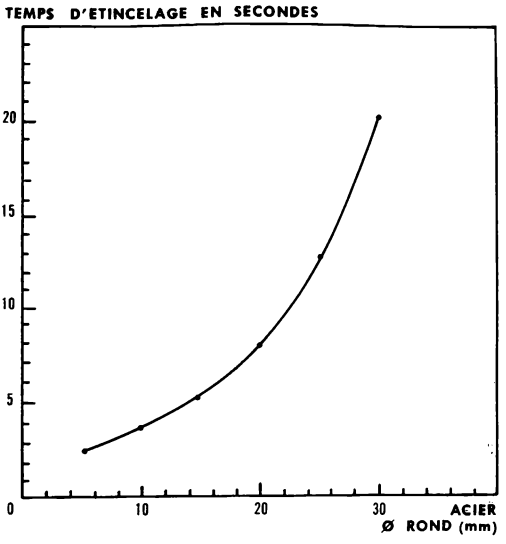


Fig. 376

Temps d'étincelage en secondes en fonction du diamètre de ronds en acier doux, ou toute section massive.

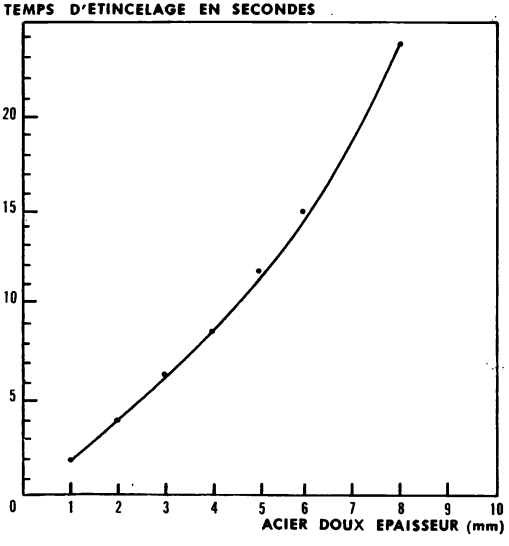


Fig. 377

Temps d'étincelage en secondes en fonction de l'épaisseur des pièces à souder. Acier doux.

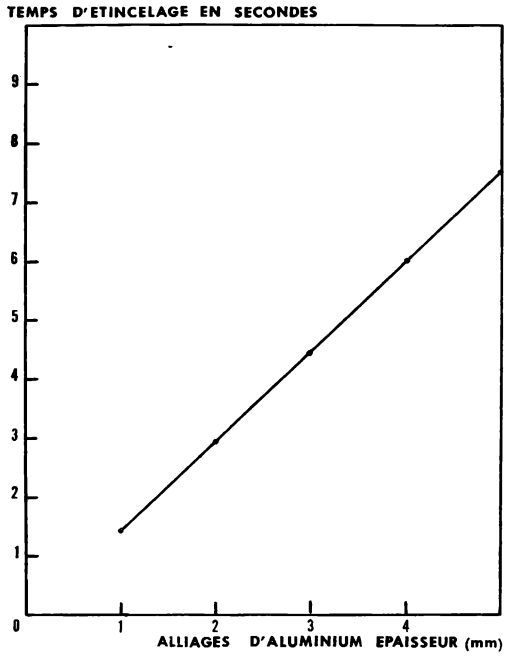


Fig. 378

Temps d'étincelage en secondes en fonction de l'épaisseur des pièces à souder
Alliages d'aluminium

VITESSE ET TEMPS DE REFOULEMENT

La vitesse de refoulement en mm/s est la vitesse de déplacement de la table mobile pendant la phase de refoulement ou de forgeage des extrémités des pièces l'une vers l'autre.

Le temps de refoulement est le temps mis par la table mobile pour effectuer la course de refoulement ou de forgeage des portions de pièces à souder portées à la température de soudage.

La vitesse de refoulement est un facteur déterminant de la qualité de la soudure.

A la fin de l'opération d'étincelage, le mouvement de la table mobile doit être rapidement accéléré de façon que le métal en fusion qui recouvre les surfaces à assembler soit expulsé avant que sa fluidité ne diminue par suite du refroidissement et avant qu'il n'ait le temps de s'oxyder. L'oxydation est en effet d'autant plus rapide que la température est élevée et risque surtout d'avoir lieu dans les fonds des cratères si la vitesse de rapprochement n'est pas suffisante.

En fait, la course de refoulement s'opère en deux stades successifs :

— *Le stade initial :* qui s'opère sur un métal fondu et très plastique, et donc de résistance mécanique peu élevée. Durant ce temps, la vitesse d'accostage doit être particulièrement élevée.

— *Le stade final :* Au fur et à mesure de la progression du refoulement, la température des régions refoulées devient de plus en plus faible. La résistance du matériau à la déformation augmente. La vitesse de la table diminue.

Les vitesses de refoulement devront être d'autant plus élevées que :

— la conductibilité thermique du matériau est élevée,

— que son aptitude à l'oxydation est marquée,

— que la profondeur de chauffe est faible.

Si, pour l'acier doux, des vitesses de forgeage modérées donnent encore de bons résultats, il n'en est pas de même pour les alliages d'aluminium.

Pour ceux-ci, en effet, des vitesses de refoulement très élevées sont indispensables surtout au stade initial d'accostage, pour assurer la soudure à température suffisamment élevée et éviter la formation d'oxydes.

Une vitesse de refoulement élevée est également nécessaire pour les aciers spéciaux, les alliages dont les composants peuvent par réaction chimique former des oxydes réfractaires tels que oxydes d'aluminium, de magnésium, de titane, de tungstène, de chrome.

Ces oxydes ayant un point de fusion supérieur à celui du métal de base, tendent à se solidifier plus rapidement aux interfaces et à être emprisonnés à moins qu'ils ne soient rapidement expulsés avant que la solidification ne soit trop avancée.

Pour les alliages d'aluminium, les aciers spéciaux et les alliages pouvant donner lieu à des oxydes réfractaires, des vitesses de refoulement de 300 à 600 mm/s sont nécessaires.

DURÉE DE PASSAGE DU COURANT PENDANT LA PHASE DE REFOULEMENT

C'est le temps qui s'écoule entre la fin de l'étincelage (début du refoulement) et la coupure du courant de soudage pendant la course de refoulement.

Cette variable peut être déterminée par sa durée en périodes. Elle peut également être dénommée temps de court-circuit.

Un temps de court-circuit de 10 périodes signifie que la pièce soudée est encore traversée par un courant électrique pendant un temps de $\frac{10}{50}$ de seconde compté à partir du début du refoulement.

Cette variable peut également être exprimée en pourcentage de la course totale de refoulement en mm.

Le prolongement du passage du courant pendant le refoulement a pour rôle :

— d'éviter tout temps d'arrêt de passage du courant entre la fin de l'étincelage et le début du refoulement et ainsi éviter l'oxydation et le refroidissement des faces à assembler;

— d'empêcher un refroidissement trop rapide de la zone de soudure pendant le forgeage.

Pour les petites sections, le point de coupure du courant ne peut pas être prolongé trop loin après le début du refoulement pour éviter une surchauffe exagérée, voire la destruction par fusion de la pièce soudée.

Il est de bonne pratique de couper le courant après la moitié de la course de refoulement.

EFFORT DE REFOULEMENT

Effort exercé par la table mobile sur les surfaces à souder pendant le forgeage. La pression spécifique de refoulement en kg par mm² de section à souder dépend des caractéristiques mécaniques à chaud et à froid du matériau, de la profondeur de la zone chauffée. Cette pression doit être suffisante pour vaincre la résistance des aspérités en contact, les déformer et refouler vers l'extérieur de la matière saine non surchauffée.

De plus, l'effort de refoulement appliqué à la table mobile, la masse de celle-ci, et le genre de mécanisme de propulsion de cette table sont les facteurs qui déterminent la vitesse de refoulement et son effet dynamique si important.

L'effort de refoulement maximum donne, en général, la capacité de soudage maximum. Des essais systématiques ont permis de montrer l'influence de la pression spécifique sur la qualité de la soudure.

Les graphiques figures 379 - 380 donnent respectivement la charge de rupture et le pourcentage de surface soudée saine, sans oxydes en fonction de la pression spécifique de forgeage.

Les valeurs de pression spécifique de refoulement recommandées sont les suivantes :

Aciers doux et demi-dur :

— *Sections massives :*
Pression refoulement : 3 à 7 kg/mm².

— *Sections à parois minces :*
Pression refoulement : 5 à 9 kg/mm².

Acier inoxydable :

Pression refoulement : 14 à 20 kg/mm².

Aciers divers à haute résistance :

Pression refoulement : 16 à 30 kg/mm².

Alliages d'aluminium :

— *Sections à parois minces :*
Pression refoulement : 16 kg/mm² jusqu'à 30 kg/mm² pour alliages spéciaux.

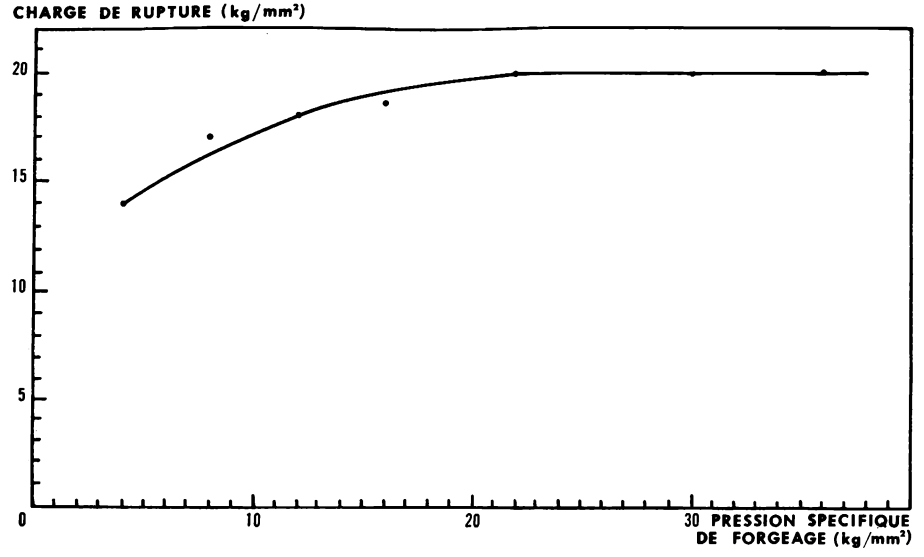


Fig. 379

Charges de rupture en fonction de la pression spécifique de forgeage dans le cas de soudage en bout par étincelage de plats en alliages d'aluminium, épaisseur 3 mm AG3.

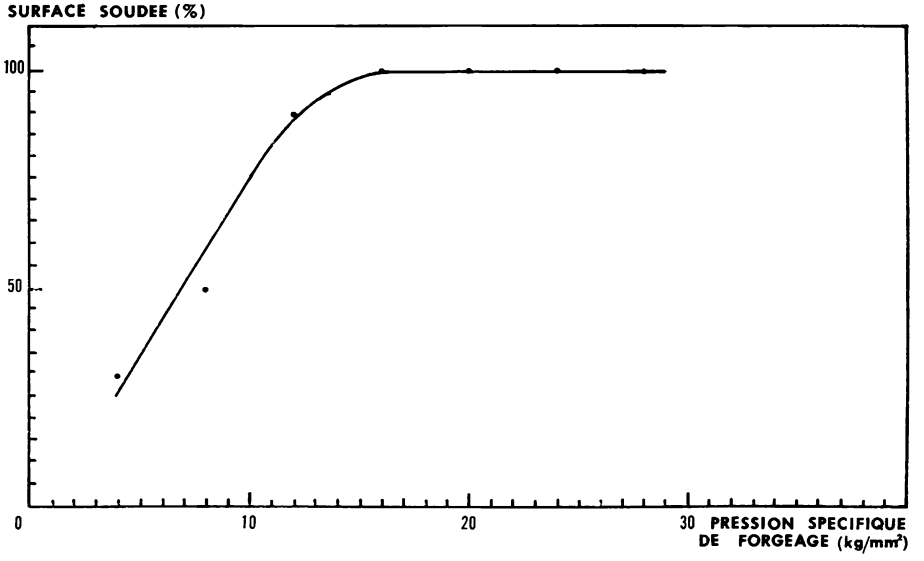


Fig. 380

Influence de la pression spécifique de forgeage sur la qualité d'une soudure en bout par étincelage de plats en alliage d'aluminium AG3, épaisseur 3 mm.

EFFORT DE SERRAGE

Il doit être suffisant pour :

Assurer une bonne commutation du courant de soudage entre l'électrode et la pièce à souder afin d'éviter toute chute de tension excessive, un échauffement nuisible, une détérioration des surfaces de contact de la pièce à souder et des mâchoires.

S'opposer au glissement des pièces à souder soumises à un effort de poussée important pendant le forgeage.

Il sera fonction :

— du coefficient de friction des pièces à souder avec les mors;
— de la forme des pièces;
— de l'effort de refoulement requis.

En général, sans butée, l'effort de serrage sera double de l'effort de refoulement et dans certains cas, triple.

AVANTAGES DU SOUDAGE EN BOUT PAR ÉTINCELAGE

1) La qualité des soudures obtenue par ce procédé est excellente.

Pour les matériaux courants, la charge de rupture et la limite élastique des assemblages réalisés par soudage par étincelage sont très proches de celles du métal de base. Aucun métal d'apport n'est ajouté. La structure de la zone soudée est celle d'une pièce forgée. La soudure peut subir un traitement thermique comme le métal de base, elle peut être emboutie, usinée, etc.

2) Le bourrelet provoqué par le refoulement est très réduit.

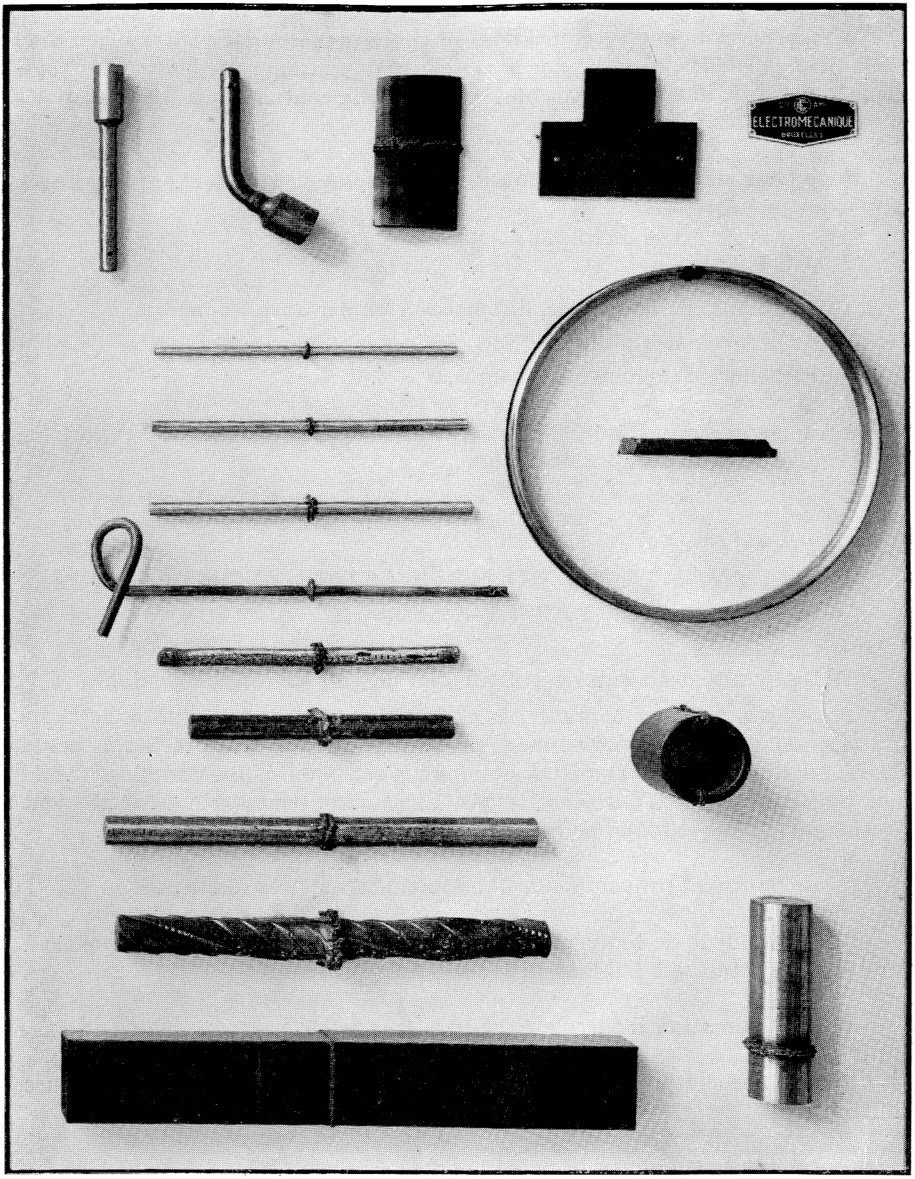
3) Le gradient de température est élevé. Le volume de matière portée à haute température est faible.

4) Consommation d'énergie électrique très faible.

5) L'étincelage permet de souder des métaux de résistivités électriques différentes.

6) Intérêt économique du procédé grâce à sa rapidité.

7) Les extrémités à souder ne nécessitent aucune préparation spéciale. Elles peuvent être cisaillées, tronçonnées, sciées, tournées, fraisées.



Quelques échantillons soudés en bout.

LES MACHINES A SOUDER EN BOUT

CLASSIFICATION

Les machines à souder en bout peuvent se classer en deux grandes catégories :

— Les machines à commande manuelle de la table mobile.

— Les machines à commande automatique de la table mobile, utilisant une source d'énergie extérieure (pneumatique, hydraulique, électrique, etc.).

Elles peuvent aussi se distinguer d'après le type de soudure qu'elles peuvent réaliser :

— Machines à souder par résistance pure;

— Machines à souder par étincelage;

— Machines à souder en bout avec touches de préchauffage.

Leur principe de fonctionnement et leur mode de construction varient suivant les types de soudure.

Les machines à souder peuvent aussi se différencier d'après le genre de dispositif de serrage dont elles sont équipées. Les dispositifs de serrage sont conditionnés par la forme et la section des pièces à souder.

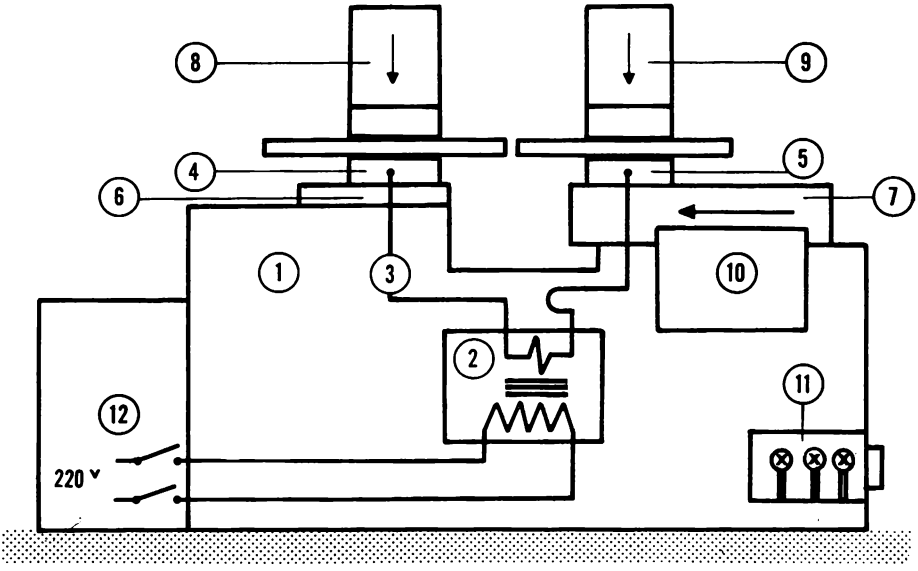


Fig. 381

Représentation schématique d'une machine à souder en bout.

1. Bâti;
2. Transformateur de soudage;
3. Connexion du circuit secondaire extérieur;
4. Electrode gauche;
5. Electrode droite;
6. Table fixe;
7. Table mobile;
8. Dispositif de serrage gauche;
9. Dispositif de serrage droit;
10. Système de mise en mouvement de la table mobile et de forgeage;
11. Système de refroidissement par circulation d'eau - Alimentation;
12. Appareillage électrique et électronique.

ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX D'UNE MACHINE A SOUDER EN BOUT

Les parties principales d'une machine à souder en bout sont les suivantes (fig. 381) :

— le bâti généralement en tôle et profilé acier soudés à l'arc (1);

— le transformateur de soudage destiné à faire circuler dans les pièces à souder le courant de soudage (2);

— le circuit secondaire extérieur destiné à assurer la liaison entre les bornes du secondaire du transformateur de soudage et les électrodes en contact avec chacune des pièces à souder (3);

— les électrodes gauche et droite fixées sur la table fixe et la table mobile, et connectées électriquement aux bornes du secondaire du transformateur (4 et 5);

— la table fixe (6);

— la table mobile (7);

— les dispositifs de serrage (8 et 9) fixés sur les tables fixe et mobile, munis de mors de serrage assurant la mise en pression des pièces contre les électrodes;

— un système de mise en mouvement et de réglage de la vitesse d'avance de la table mobile (10);

— un système développant l'effort de forgeage pendant la période de refoulement (10);

— un système de refroidissement par circulation d'eau des organes sujets à échauffement pendant le passage du courant (11);

— un appareillage électrique et éventuellement électronique (12) ayant les rôles suivants :

- Enclencher et couper le courant de soudage aux moments voulus.
- Contrôler le temps de passage du courant pendant les phases d'étincelage et de refoulement.
- Contrôler le temps d'une touche de préchauffage et le temps total de préchauffage.
- Régler la valeur du courant de préchauffage, d'étincelage, de refoulement, de recuit.
- Assurer l'automatisation partielle ou complète de l'opération de soudage.

LE TRANSFORMATEUR

Il fournit l'énergie électrique nécessaire au chauffage des extrémités des pièces à souder.

Le transformateur monophasé alternatif est le plus souvent utilisé et il est identique au transformateur utilisé dans les machines à souder par points et nous renvoyons le lecteur à la page 95.

Une remarque s'impose cependant :

Dans la construction du transformateur on veillera à sa protection parfaite contre les projections de poussières métalliques produites lors de l'étincelage.

SYSTÈME DE MISE EN MOUVEMENT ET EN PRESSION DE LA TABLE MOBILE

Etincelage

Pendant son avance, la table mobile doit compenser la perte de matière due à l'action d'étincelage. Sa vitesse doit être telle que les faces soient toujours dans les conditions d'étincelage idéales. Le mouvement est habituellement lent, et uniformément accéléré.

Forgeage

Le mouvement lent de la table pendant l'étincelage sera suivi d'un mouvement final très rapide, sous forte pression qui assurera le forgeage des faces portées à haute température.

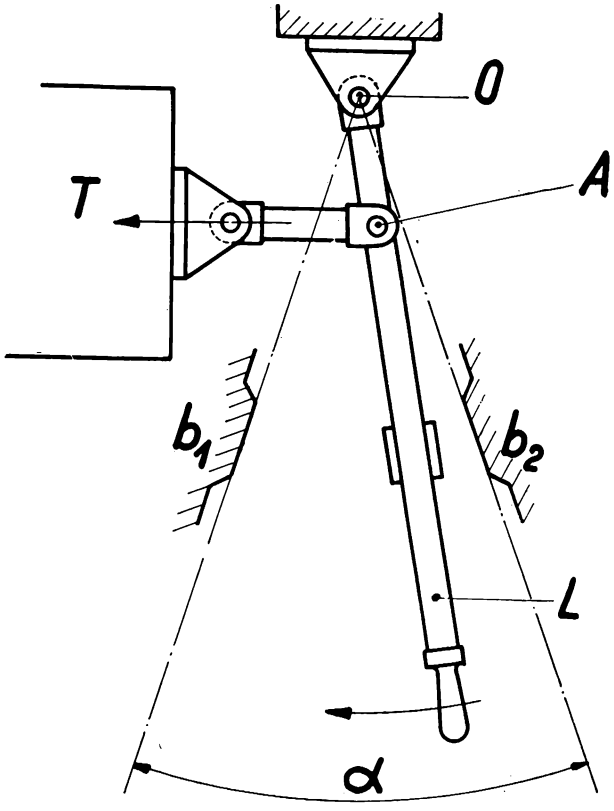


Fig. 382

Principe du mécanisme de commande manuelle de la table mobile.

Commande manuelle de la table mobile

Le dispositif le plus utilisé est constitué par un levier horizontal commandé à la main, et attaquant la table mobile par une démultiplication.

La figure 382 donne le principe du mécanisme de cette commande.

Le déplacement angulaire total est limité par deux butées. L'amplitude du déplacement de la table est déterminée par la position du point A sur le levier. La position de ce point est réglable et permet donc de régler la course.

La figure 383 représente la photo d'une machine à souder en bout à commande manuelle, avec ses principaux éléments constitutifs.

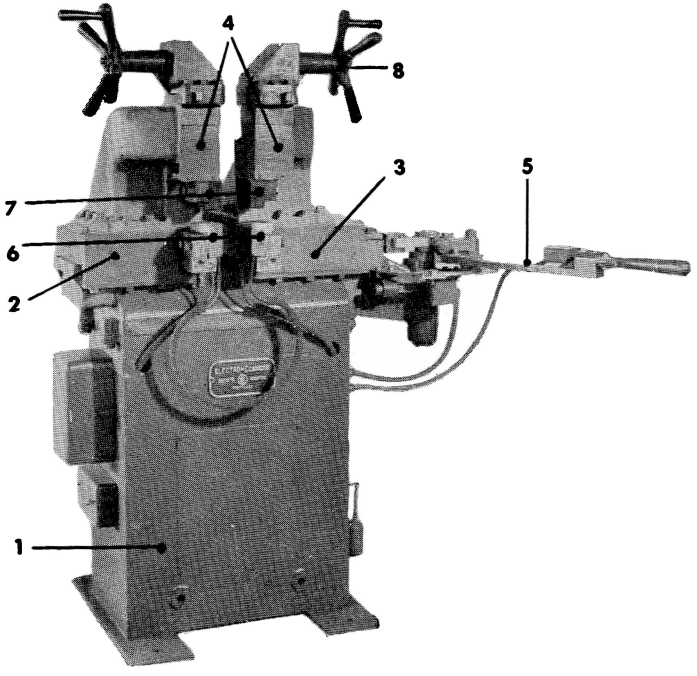


Fig. 383

Exemple de machine à souder en bout à commande manuelle.

1. Bâti
2. Table fixe
3. Table mobile
4. Dispositif de serrage
5. Levier de manœuvre de la table mobile

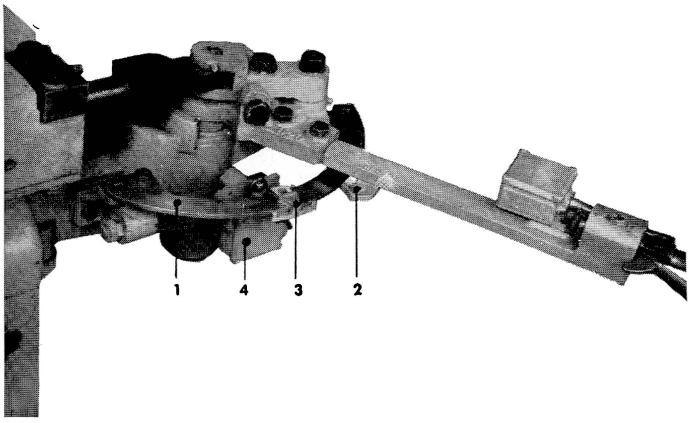


Fig. 384

1. Secteur gradué
2. Index du levier
3. Repère réglable sur le secteur
4. Interrupteur commandant automatiquement la coupure du courant.

La figure 384 donne les détails du mécanisme de commande de la table mobile.

Le levier de commande de la machine (5, fig. 383) est pourvu d'un index se déplaçant le long d'un secteur gradué en dixièmes de la course.

Un repère réglable (3, fig. 384) est fixé sur le secteur (1). Lorsque l'index (2) du levier arrive en face du repère du secteur, l'opérateur est averti que le refoulement doit débuter, c'est-à-dire que le levier doit, à cet instant, être poussé énergiquement et rapidement à fond de course.

Généralement le début du forgeage doit commencer aux 8/10 de la course.

Le repère du secteur est donc réglé en conséquence.

Le levier comporte encore une came qui actionne un interrupteur (4) qui assure la coupure du courant.

Le courant doit être coupé pendant le forgeage. Il est habituellement coupé aux 9/10 de la course.

La course de soudage ou longueur de matière brûlée est réglée comme indiqué précédemment.

La réussite de l'opération est directement liée à la manœuvre du levier de commande. Elle dépend donc totalement de l'opérateur. Il s'agit d'imprimer à la table mobile le mouvement voulu pour obtenir un cycle correct.

Il débutera en donnant à la table mobile une vitesse d'approche lente de façon à amorcer l'étincelage, puis uniformément accélérée pour se terminer par le refoulement rapide, énergique au moment où l'index se place devant le repère du secteur gradué. L'opérateur veillera à éviter tout arrêt entre l'étincelage et le début du refoulement.

Il importe que l'opérateur se place convenablement pour commander aisément la machine, et surtout pour lui permettre de déployer, sans grande fatigue, l'effort musculaire rapide nécessaire pour le forgeage (fig. 385 - 386 et 387).

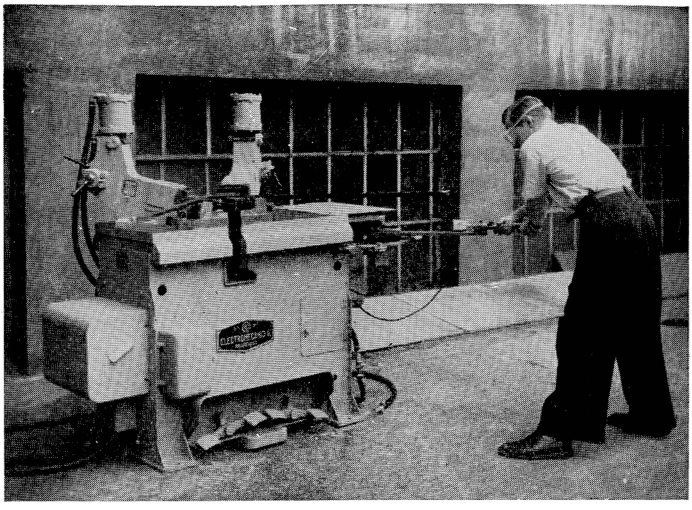


Fig. 385
Position du soudeur au début de l'étincelage.

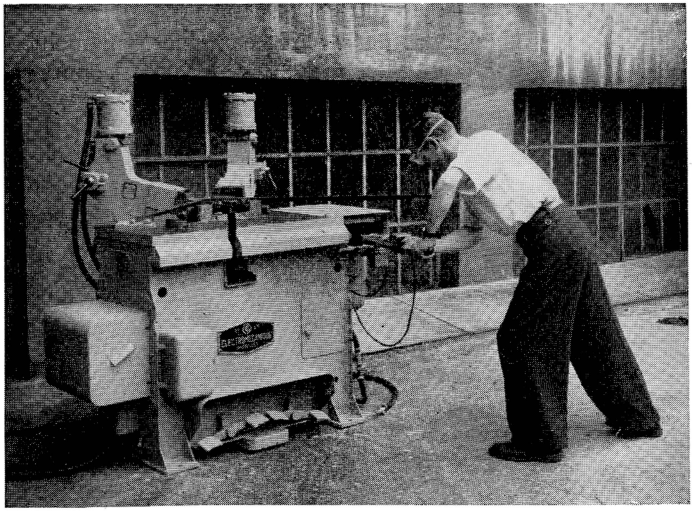


Fig. 386
Position du soudeur au refoulement.

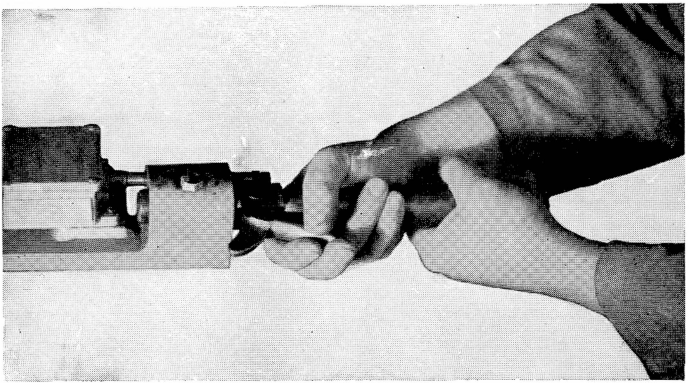


Fig. 387
Position correcte des mains du soudeur sur le levier de manœuvre.

Les capacités de soudage des machines à commande manuelle dépassent rarement des sections en acier de 1 200 mm². Ces machines ne peuvent pas être utilisées pour le soudage des alliages légers.

Les machines à commande automatique

Pratiquement indépendante du facteur humain, les machines automatiques assurent une reproduction fidèle des valeurs données aux divers paramètres de réglage. Elles donnent donc toute sécurité quant à la régularité de la qualité des soudures.

Elles permettent des productions très élevées, l'élément « fatigue de l'opérateur » n'entrant plus en jeu.

Elles se prêtent à la réalisation de cycles complètement automatiques.

Elles autorisent le soudage de sections et de qualités de matériaux qu'il est tout à fait impossible de souder sur machines manuelles à cause des efforts de forgeage élevés qu'elles peuvent développer et des grandes vitesses qu'elles sont capables d'assurer à la table mobile pendant la course de forgeage.

Machines automatiques à commande par came

Le déplacement de la table mobile est commandé par une came dont la rotation est assurée par un groupe moteur électrique-réducteur de vitesse. Un bossage prévu à un endroit déterminé de la périphérie de la came détermine l'instant et la course du forgeage.

Une came déterminée ne convient que pour le soudage d'un nombre limité de sections. Pour cette raison, ces machines ne sont utilisées que pour des productions en grande série.

La figure 388 représente la photo d'un mécanisme de commande par came.

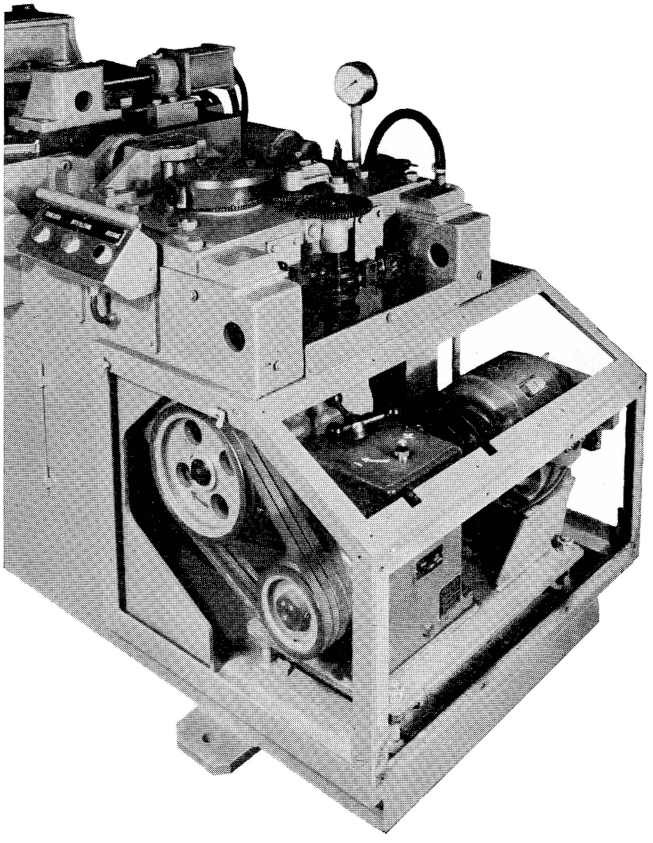


Fig. 388

Mécanisme de commande automatique de la table mobile par came.

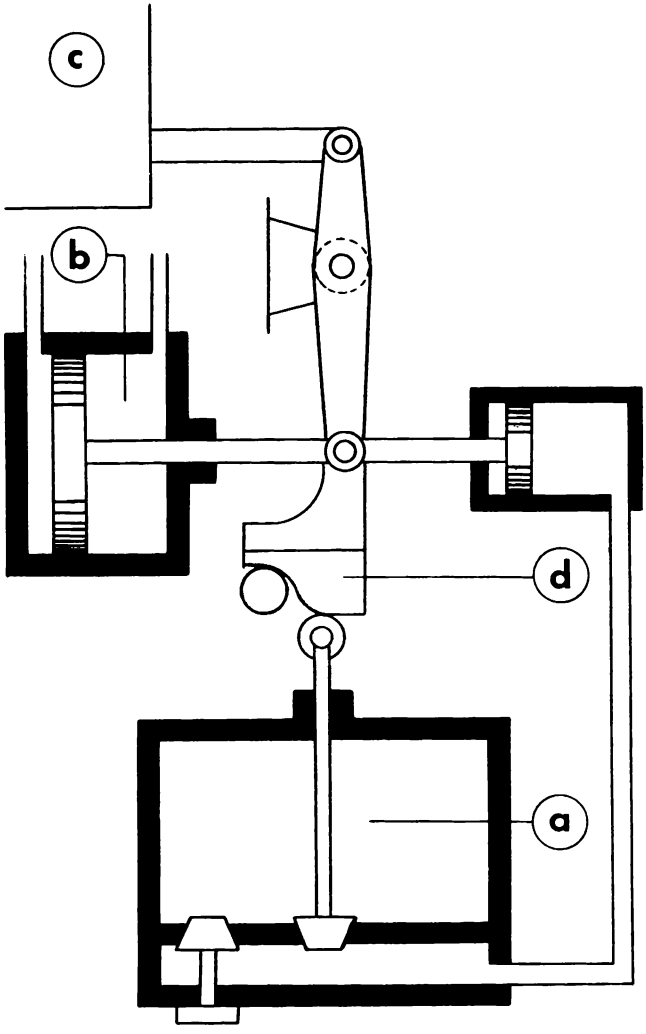


Fig. 389
Principe de commande oléo-pneumatique de la table mobile.

Machines automatiques à commande oléo-pneumatique

Les mouvements d'avance et de recul de la table mobile sont assurés par un cylindre pneumatique moteur.

La vitesse de la table est contrôlée pendant l'étincelage et le forgeage par un amortisseur hydraulique.

La figure 389 montre le principe de fonctionnement oléopneumatique. Le cylindre pneumatique (b) est le cylindre moteur qui par l'intermédiaire de leviers fournit l'effort d'avance à la table mobile (c).

A l'autre extrémité de la tige du piston pneumatique est fixé un deuxième piston qui se déplace dans un cylindre hydraulique. Ce deuxième piston repousse l'huile qui doit s'échapper par la vanne de l'amortisseur.

La vitesse de déplacement de la table dépendra du débit d'huile réglable de la vanne d'échappement de l'amortisseur.

Pour un effort donné du cylindre pneumatique moteur, la vitesse de la table mobile dépendra de la section de passage dans la vanne de l'amortisseur.

C'est la position initiale et la forme de la came (d) liée au mouvement de la table qui détermineront à chaque instant le degré d'ouverture de la vanne et de ce fait la vitesse de la table.

Au moment du refoulement la vanne de régulation s'ouvre rapidement et complètement. L'effet de frein disparaît.

L'effort du piston pneumatique est totalement appliqué à la table mobile.

La détente de l'air comprimé accumulé dans le cylindre moteur (b) projette à grande vitesse la table mobile vers la table fixe, assurant le forgeage des extrémités des pièces portées à la température de soudage.

L'appareillage auxiliaire utilisé pour l'alimentation pneumatique est identique à celui utilisé dans les machines à souder par points.

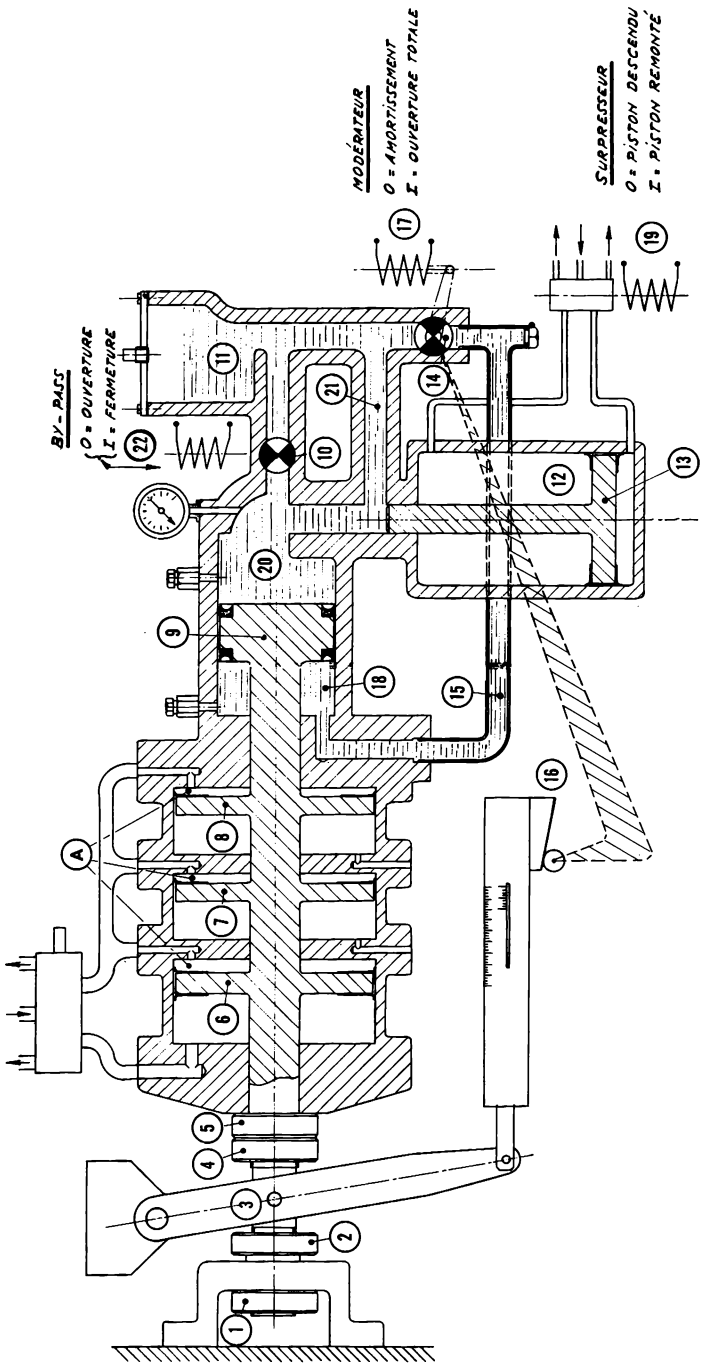


Fig. 390

Principe de commande oléo-pneumatique de la table mobile avec surpresseur de forgeage.

Machines automatiques à commande oléo-pneumatique et surpresseur pneumo-hydraulique

La vitesse d'avance de la table mobile est contrôlée par un dispositif oléo-pneumatique identique au précédent mais l'effort de forgeage est donné par un surpresseur pneumo-hydraulique qui transforme une pression d'air en une pression d'huile très élevée.

La figure 390 représente le croquis d'un dispositif de commande oléo-pneumatique de la table mobile avec effort de forgeage assuré par un surpresseur.

L'axe central du bloc-cylindre oléo-pneumatique est fixé à la table mobile par les écrous (1) et (2).

Les écrous (4) et (5) limitent le recul de la table à la valeur voulue, ce qui constitue le réglage de la course de soudage.

Les pistons (6) (7) et (8) sont alimentés par de l'air comprimé sur les faces (A) lors du mouvement d'avance de la table. Seul le piston (6) à double effet est utilisé pour le recul.

Le piston hydraulique (9) a comme fonctions de contrôler la vitesse de déplacement de la table pendant l'étincelage et éventuellement pendant les touches de préchauffage et de fournir un effort de forgeage supplémentaire pendant la période de refoulement.

Une vanne by-pass (10) ferme le passage entre le réservoir (20) et le réservoir à huile (11) pendant l'action du surpresseur.

Le surpresseur se compose d'un cylindre pneumatique (12), d'un piston plongeur (13) dont la face inférieure est soumise au moment du forgeage à une pression d'air comprimé.

Le modérateur (14) est l'amortisseur hydraulique dont le degré d'ouverture détermine la vitesse de la table mobile.

Si l'air sous pression est admis sur les trois faces A des pistons 6 - 7 - 8 la table est sollicitée à se déplacer vers la gauche. L'huile contenue dans la chambre B passe par le tube (15) et par le modérateur (14) pour arriver dans le réservoir (11).

Si le modérateur (14) est fermé, l'huile bloque le mouvement. Le déplacement de la table est impossible.

S'il est légèrement ouvert, le mouvement de la table sera très lent.

S'il est complètement ouvert, le mouvement de la table pourra être très rapide. A ce moment, l'huile n'opposant plus aucune résistance, l'effort conjugué des trois pistons moteurs se reportera entièrement sur la table de soudage.

Le degré d'ouverture du passage d'huile dans le modérateur est contrôlé par l'inclinaison d'une came dont le déplacement est solidaire du déplacement de la table elle-même (16).

L'ouverture totale et rapide du passage du modérateur au moment du refoulement est assurée par un électro-aimant (17).

Pour l'opération « Recul de la table », l'air sous pression est admis dans la chambre R et le déplacement s'opère vers la droite tandis que la chambre (18) se remplit d'huile, du fait que, à ce moment, le modérateur (14) est totalement ouvert.

Fonctionnement du surpresseur de forgeage

Au moment du forgeage :

— L'électro-aimant (17) est excité grâce à la fermeture des contacts d'un fin de course actionné par une came réglable fixée sur un coulisseau solidaire du mouvement de la table mobile. Cette came sert au réglage de la longueur de refoulement.

L'excitation électrique de l'électro-aimant (17) provoque l'ouverture totale du passage d'huile dans le modérateur.

Au même instant l'électro-vanne pneumatique (19) est également mise sous tension électrique et dirige de l'air comprimé à une pression réglée à la partie inférieure du cylindre (12).

Le piston est soumis à la pression d'air et le plongeur s'enfonce dans la chambre d'huile (20), en obturant le conduit (21).

Au même instant le by-pass (10) ferme le passage d'huile grâce à l'excitation de l'électro-aimant (22).

Toute issue étant ainsi obstruée, le plongeur comprime l'huile dans la chambre (20).

Le piston (9) est soumis à une poussée hydraulique qui peut être très élevée et qui s'ajoute à l'effort pneumatique des pistons (6) (7) et (8) fournissant l'effort de forgeage.

Ce système se prête facilement à la réalisation de cycles de soudage avec préchauffage et à l'automatisation des opérations.

LES ÉLECTRODES

L'électrode est la pièce conductrice qui assure la commutation du courant de soudage entre le circuit secondaire du transformateur et la pièce à souder (fig. 381, page 404).

Une électrode est fixée sur la table fixe, l'autre électrode est fixée sur la table mobile.

Le serrage des pièces dans les électrodes est assuré par les dispositifs de serrage, par l'intermédiaire d'un mors en contact avec la pièce à souder sur la face opposée.

La forme des électrodes et des mors de serrage sera judicieusement adaptée au profil de la pièce à souder (fig. 391).

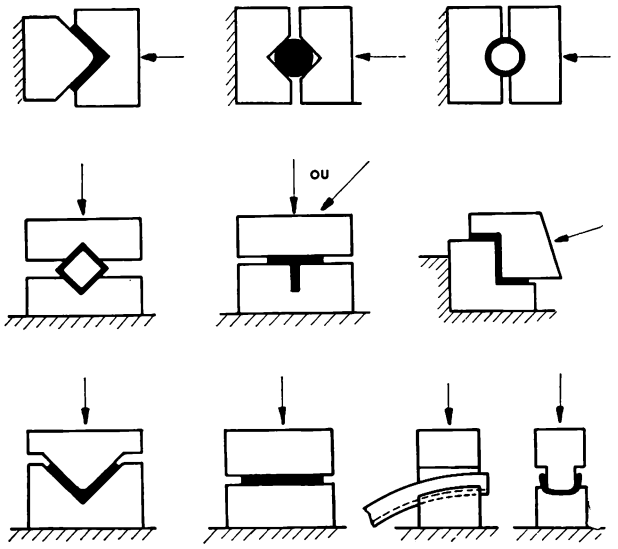


Fig. 391

Quelques cas d'électrodes et de mors de serrage. La flèche indique la force de serrage.

On veillera spécialement à la forme des mors et des électrodes dans le cas de pièce de faible résistance mécanique à l'écrasement, de faible épaisseur et dans le cas des alliages légers.

La surface de contact entre l'électrode et la pièce sera suffisante pour éviter tout échauffement au contact pièce-électrode.

Les matières utilisées pour les électrodes et les mors de serrage sont : le cuivre, les alliages de cuivre, l'acier doux, l'acier trempé.

LES TABLES

Sur les tables sont fixés les dispositifs de serrage et les électrodes.

L'une des tables (la table gauche par exemple) est fixée rigidement au bâti, c'est la table fixe. La table mobile (table droite) est solidaire de deux barres coulissantes s'engageant à l'avant et à l'arrière dans des paliers lisses ou à aiguilles (fig. 392).

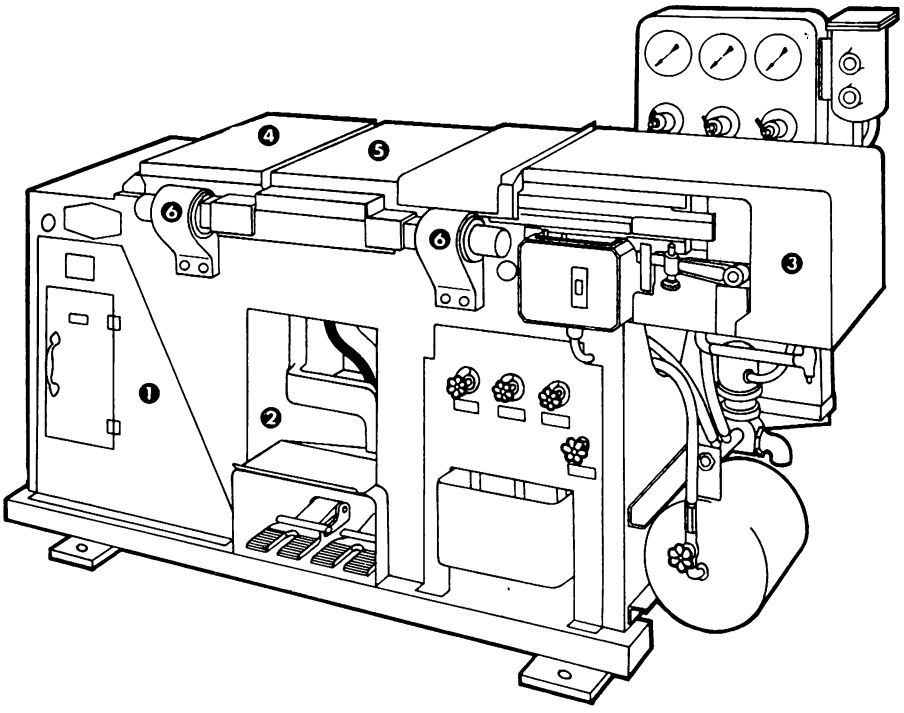


Fig 392

Vue schématique d'une machine à souder en bout à commande oléo-pneumatique non équipée de dispositif de serrage.

1. Transformateur.
2. Cheminée d'évacuation des projections métalliques créées par l'action d'étincelage.
3. Mécanisme de commande oléo-pneumatique.
4. Table fixe.
5. Table mobile.
6. Paliers de guidage de la table mobile.

LES DISPOSITIFS DE SERRAGE

Les dispositifs de serrage doivent :

Exercer un effort de serrage suffisant sur les pièces afin de réduire au minimum la valeur de la résistance de contact « pièce-électrode » et ainsi assurer une bonne commutation du courant aux pièces.

Empêcher tout glissement des pièces serrées entre mors et électrode lors du refoulement.

Il existe différents types de dispositifs de serrage adaptés à la forme des pièces.

Le serrage manuel n'est plus que rarement utilisé. Les dispositifs de serrage utilisent généralement un fluide sous pression (air ou huile) : cylindre pneumatique à attaque directe ou par l'intermédiaire de leviers, pompe hydraulique alimentant des cylindres, surpresseur d'huile.

Le serrage à balancier

Les pièces sont posées sur les électrodes inférieures. Le balancier est rabattu manuellement sur la pièce à souder et maintenu en position par un étrier d'accrochage (fig. 393). L'effort de serrage est obtenu par l'action d'un cylindre pneumatique.

Ce système, employé pour le soudage de feuillard, tube, rond, n'est plus guère utilisé.

La figure 394 représente une machine à souder automatique équipée de dispositifs de serrage à balancier pour le soudage de jantes en alliage d'aluminium.

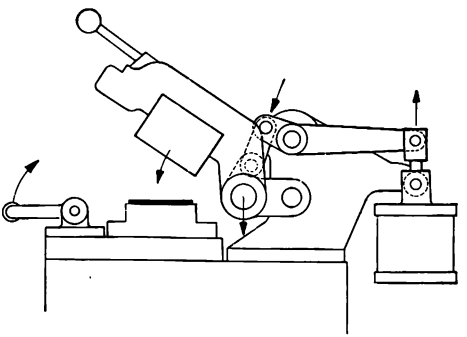


Fig. 393
Type de dispositif de serrage à balancier.

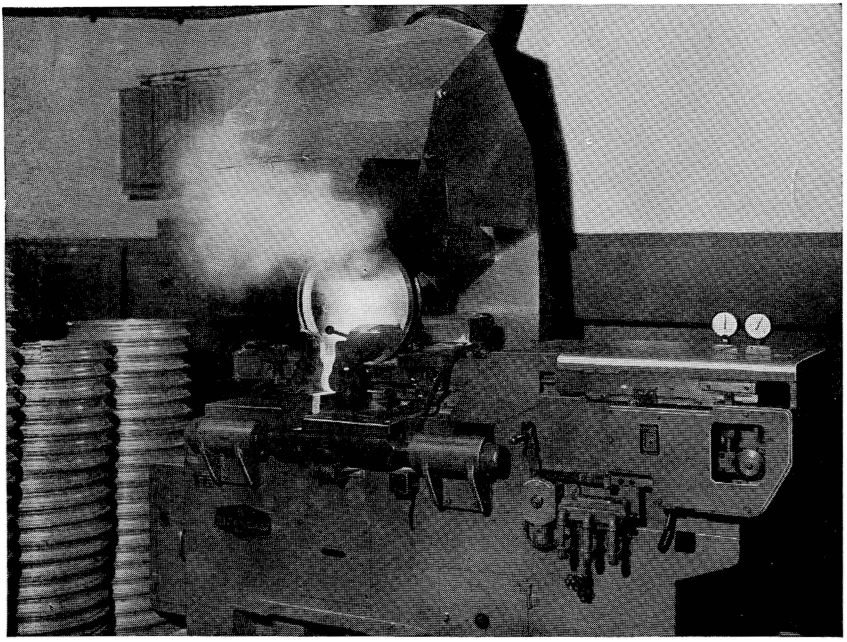


Fig. 394

Machine à souder automatique équipée de dispositifs de serrage à balancier pour le soudage de jantes en alliage d'aluminium

Le serrage vertical

Ce système est caractérisé par la descente verticale du mors de serrage supérieur.

L'effort de serrage peut être engendré soit pneumatiquement, soit hydrauliquement.

La figure 395 donne le principe d'un dispositif de serrage vertical de faible capacité.

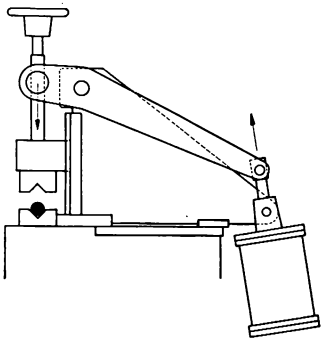


Fig. 395
Type de dispositif à serrage vertical.

La figure 396 donne le croquis en vue latérale d'une machine à souder en bout de forte puissance équipée de dispositifs à serrage vertical.

Elle est destinée au soudage rectiligne avec touches de préchauffage de pièces en acier doux et aciers spéciaux de sections allant jusqu'à 8 000 mm². Elle est entièrement automatique.

Chaque dispositif de serrage comporte un « col de cygne » en acier coulé sur lequel s'adapte le groupe de pression pneumo-hydraulique.

L'effort de serrage maximum est de 60 000 kg. Il est assuré par un surpresseur d'huile alimenté pneumatiquement.

Le dispositif de serrage gauche est réglable dans le sens vertical tandis que le dispositif de serrage droit est réglable dans le sens horizontal.

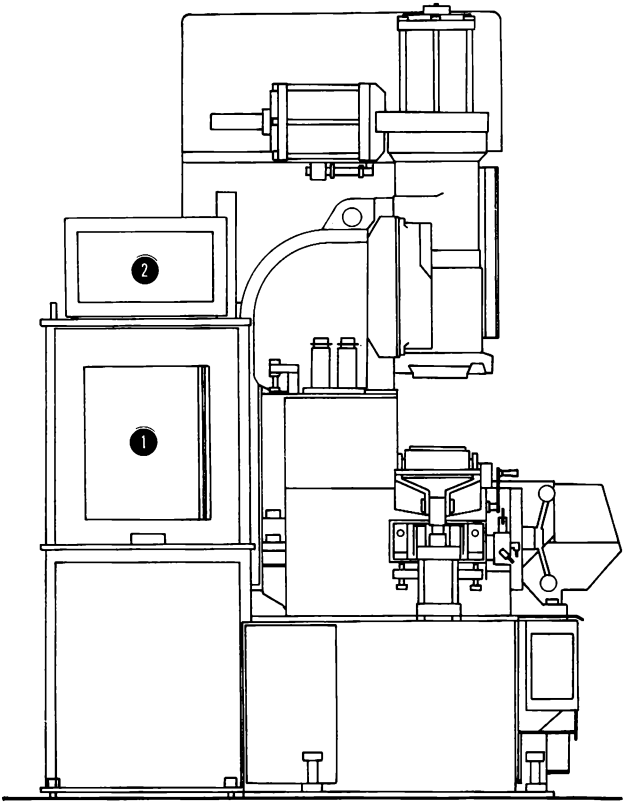


Fig. 396

Vue latérale d'une machine à souder en bout de forte puissance, avec dispositifs à serrage vertical. Effort de serrage : 60 000 kg.

La figure 397 montre cette machine utilisée pour le soudage de rails de chemins de fer.

La figure 398 montre des dispositifs de serrage adaptés pour le soudage d'ages de charrues.

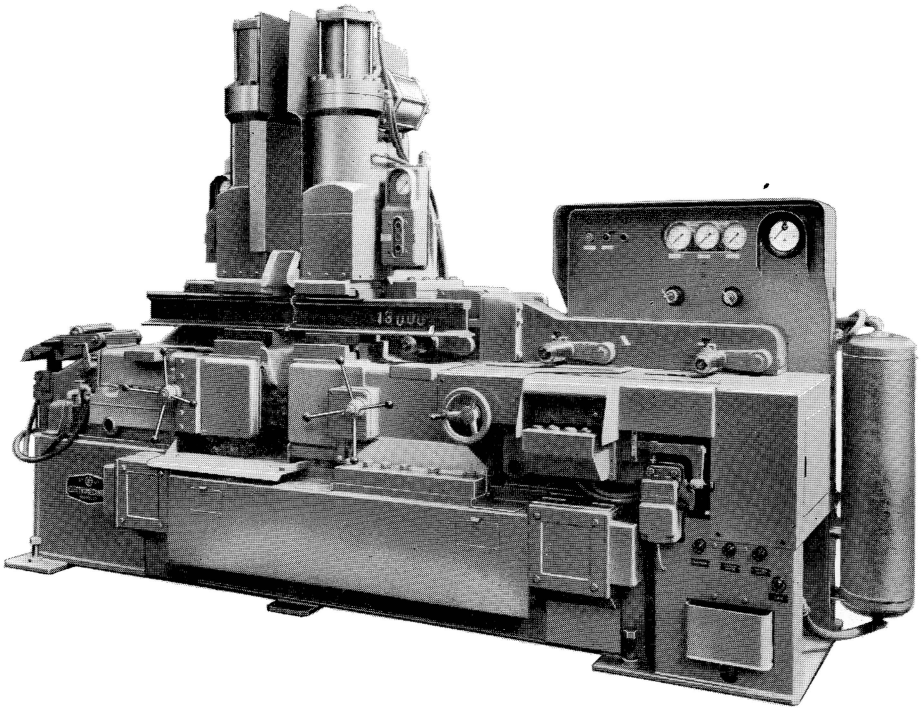


Fig. 397
Machine à souder les rails.

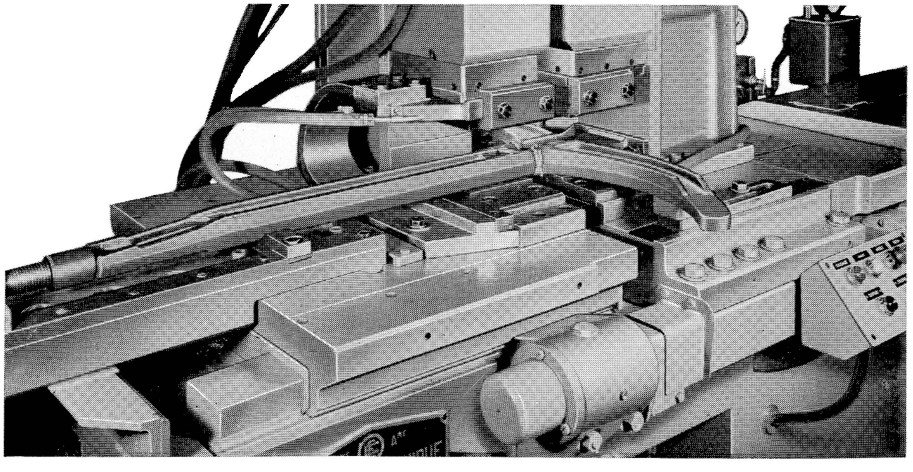


Fig. 398
Dispositifs de serrage adaptés pour le soudage d'ages de charrues.

Le serrage vertical est encore appliqué pour le soudage de feuillards de grande largeur.

La figure 399 représente une machine à souder en bout de puissance moyenne pour feuillards largeur maximum 600 mm — section maximum en acier doux 3 000 mm².

Elle est équipée d'un dispositif de serrage vertical à « guillotine ». Dans ces cas, vu la grande largeur des pièces à souder, le serrage en porte à faux n'est pas utilisé.

Une raboteuse est incorporée à la machine à souder. La figure 400 montre les porte-outils et outils de rabotage inférieur et supérieur se déplaçant dans l'axe de soudure. Grâce à l'automatisation complète du fonctionnement du groupe Machine à souder - Raboteuse, les bourrelets de soudure inférieur et supérieur sont arasés immédiatement à la fin du refoulement alors qu'ils sont encore portés à haute température.

La figure 401 montre une machine à souder les feuillards de largeur maximum 1 600 mm.

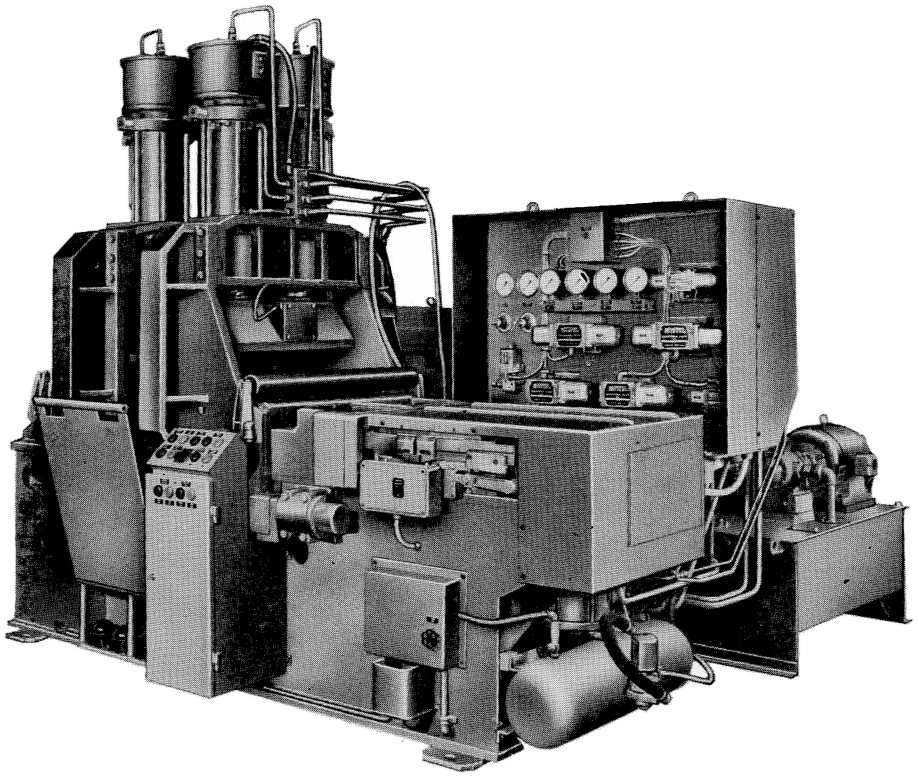


Fig. 399

Machine à souder en bout pour soudage de feuillards en acier de largeur maximum 600 mm.

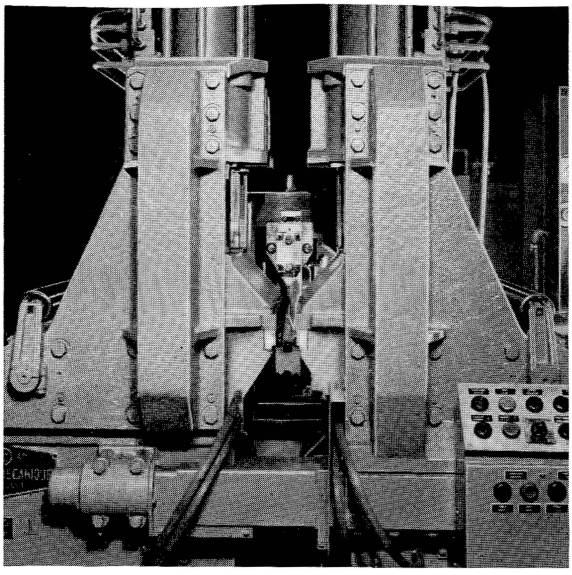


Fig. 400

Vue des dispositifs de serrage et des têtes de rabotage de la machine représentée à la figure 399.

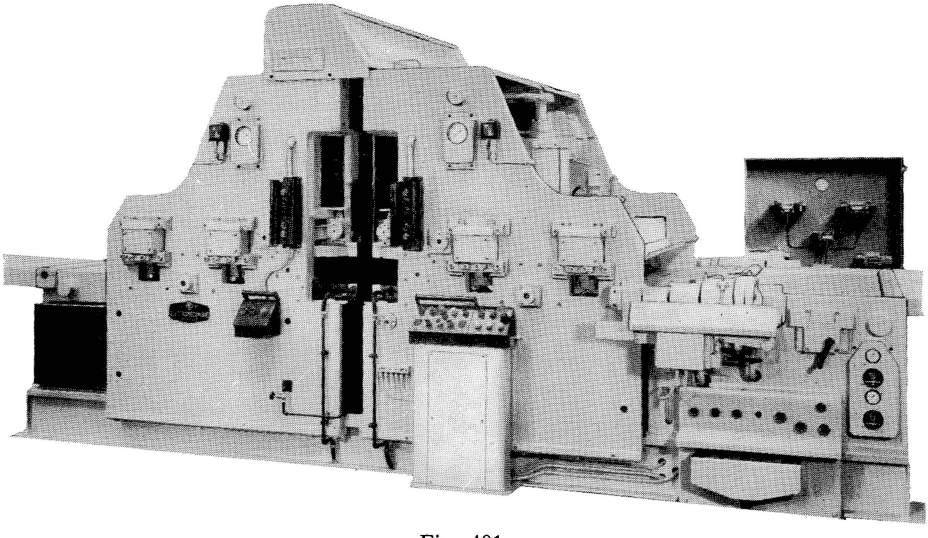


Fig. 401

Machine à souder les feuillards acier de forte puissance. Largeur maximum des feuillards : 1 600 mm.

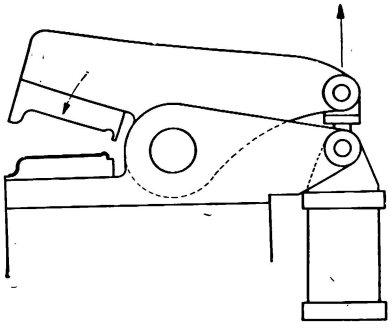


Fig. 402
Dispositif de serrage « Alligator ».

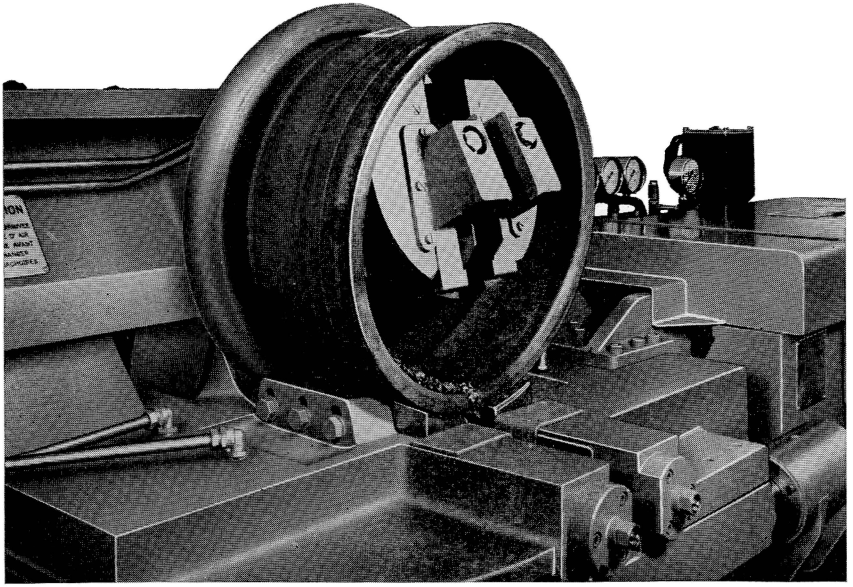


Fig. 403
Dispositif de serrage « Alligator » sur machine à souder les jantes.

Le serrage « Alligator »

L'accostage du mors de serrage se fait suivant un arc de cercle.

L'effort de serrage est transmis par un levier en porte-à-faux et peut être engendré par un système pneumatique ou hydraulique (fig. 402).

Ce type de dispositif de serrage est utilisé pour le soudage de jantes de voitures et de camions (fig. 403 et 404).

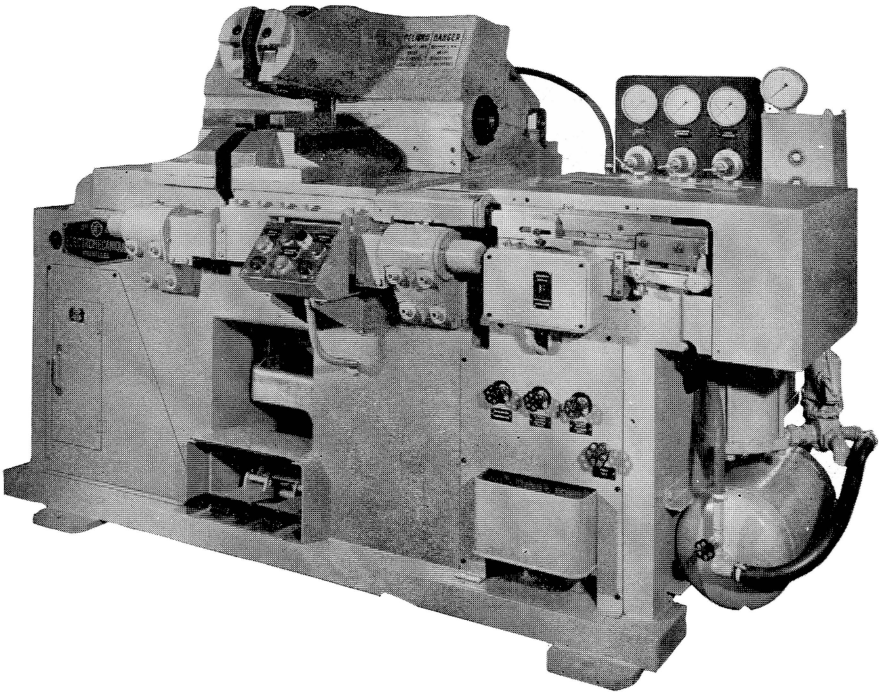


Fig. 404

Machine à souder en bout à commande oléopneumatique, équipée de dispositif de serrage « Alligator » pour le soudage de jantes.

Le serrage horizontal ou oblique

Ce dispositif peut être monté directement sur les tables de la machine ou sur une semelle inclinée.

Le déplacement du mors de serrage se fera, suivant le cas, dans un plan horizontal ou dans un plan oblique (voir fig. 405).

La position inclinée des mors de serrage donne lieu à une composante de serrage verticale intéressante pour assurer automatiquement la mise à niveau des pièces (fig. 406).

Les deux dispositifs peuvent être montés :

1) avec leurs axes de serrage parallèles;

2) avec leurs axes de serrage faisant entre eux un certain angle le plus souvent égal à 90° (fig. 407).

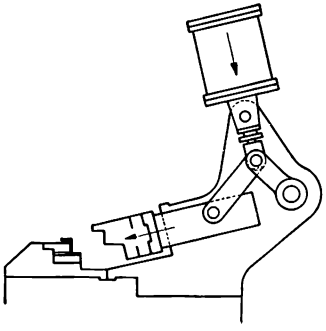


Fig. 405

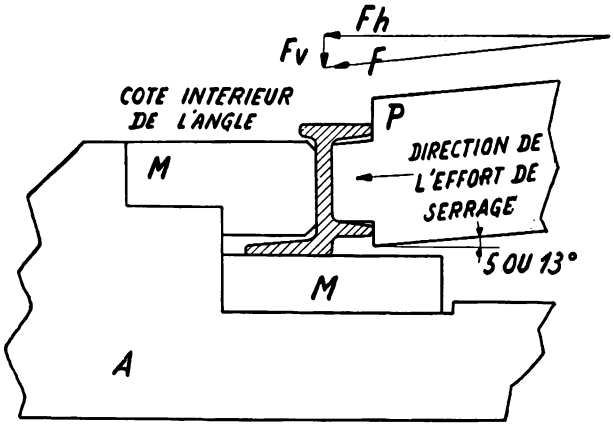


Fig. 406
Dispositif à serrage oblique.

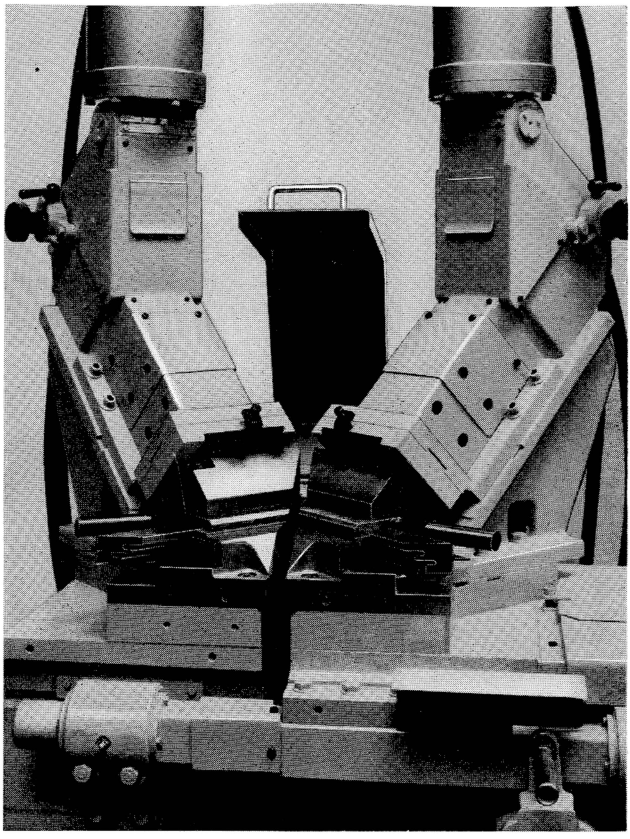


Fig. 407.
Dispositifs de serrage oblique faisant entre eux un angle de 90°.

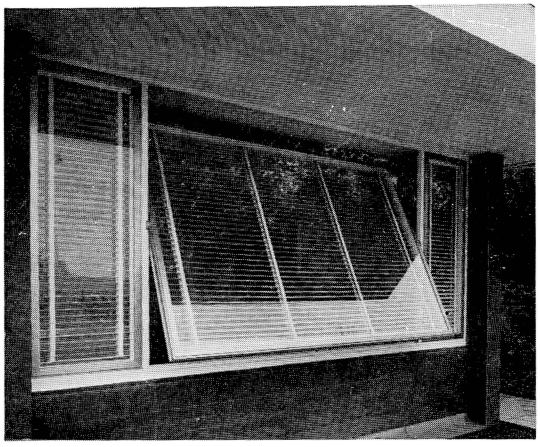
Les machines avec dispositifs de serrage montés à 90° (en onglet) sont largement utilisées :

1) pour le soudage par étincelage de cadres constituant les châssis de fenêtres en menuiserie métallique (fig. 408), les chambranles, etc.;

2) pour le soudage par étincelage d'encadrements de portières de voitures automobiles (fig. 409);

3) pour le soudage par étincelage de cadres pour baies de voitures métalliques de chemin de fer (fig. 410) et toutes applications d'assemblages de pièces faisant entre elles un certain angle (fig. 412 et 413).

La figure 411 représente une machine à souder en onglet par étincelage de forte puissance spécialement conçue pour le soudage des alliages légers grâce à sa vitesse de refoulement exceptionnelle. Son effort de refoulement est de 25 000 kg.



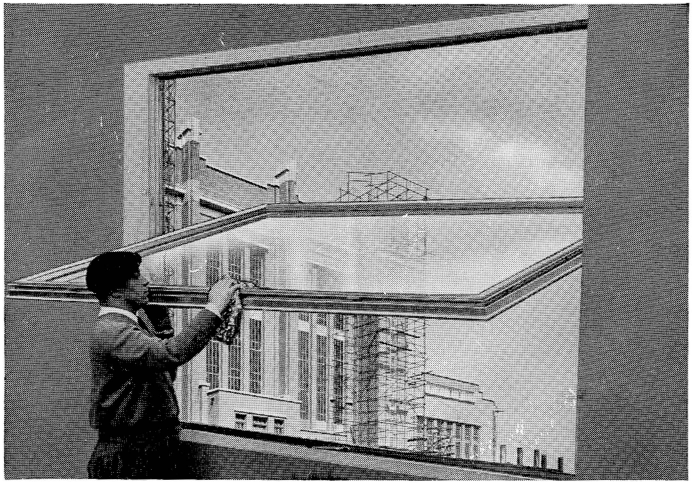


Fig. 408

Châssis en alliage léger assemblés sur machine à souder en onglet automatique.

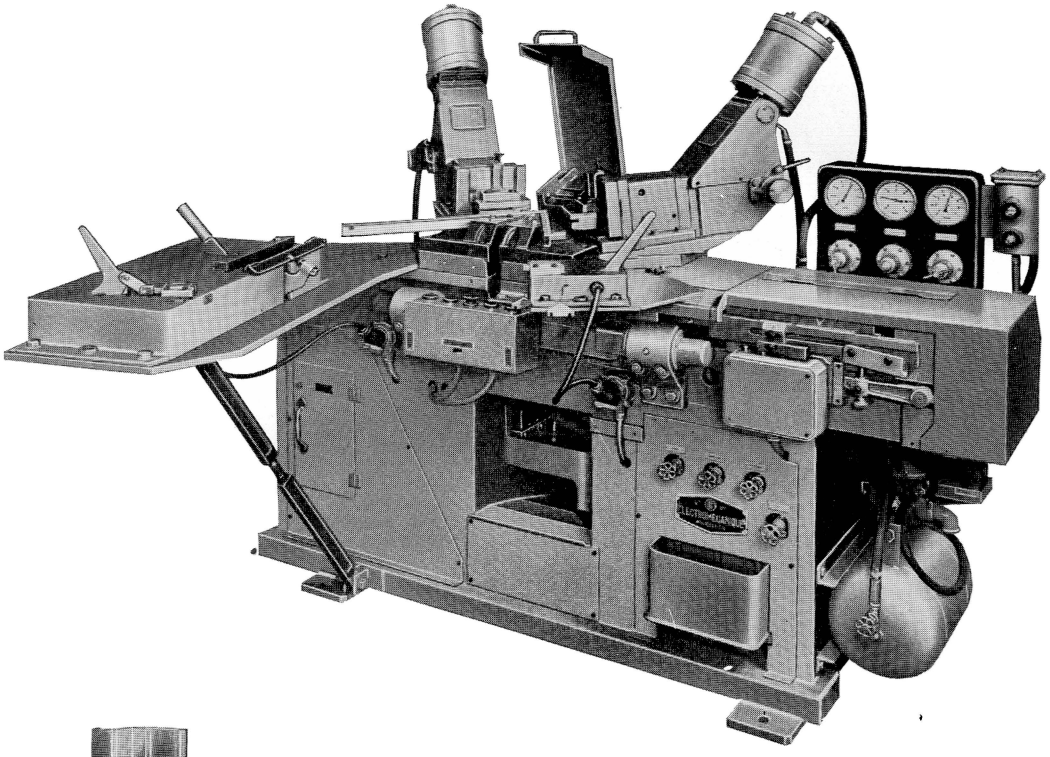


Fig. 409

Machine à souder automatique adaptée pour le soudage des encadrements de portières de voitures automobiles.

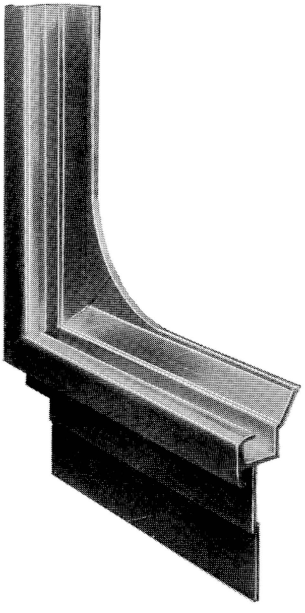


Fig. 410

Section d'un cadre en alliage léger pour baies de voitures de chemins de fer.

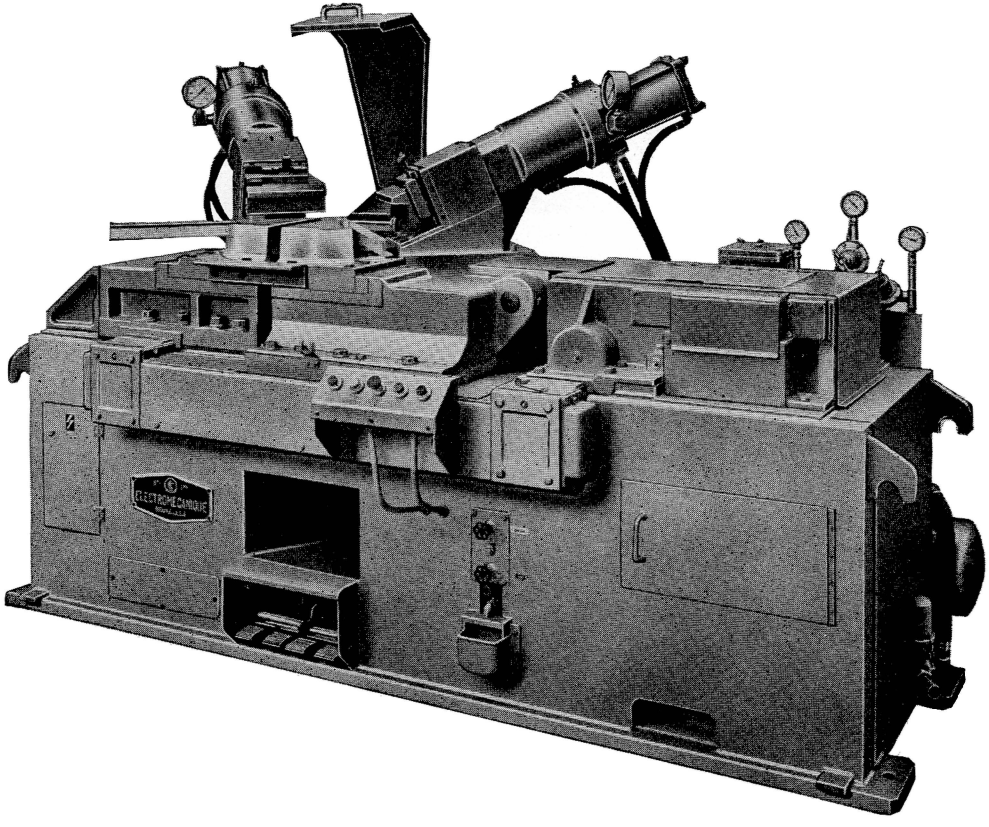


Fig. 411

Machine à souder en onglet, par étincelage,
spécialement conçue pour les profils en alliages légers.

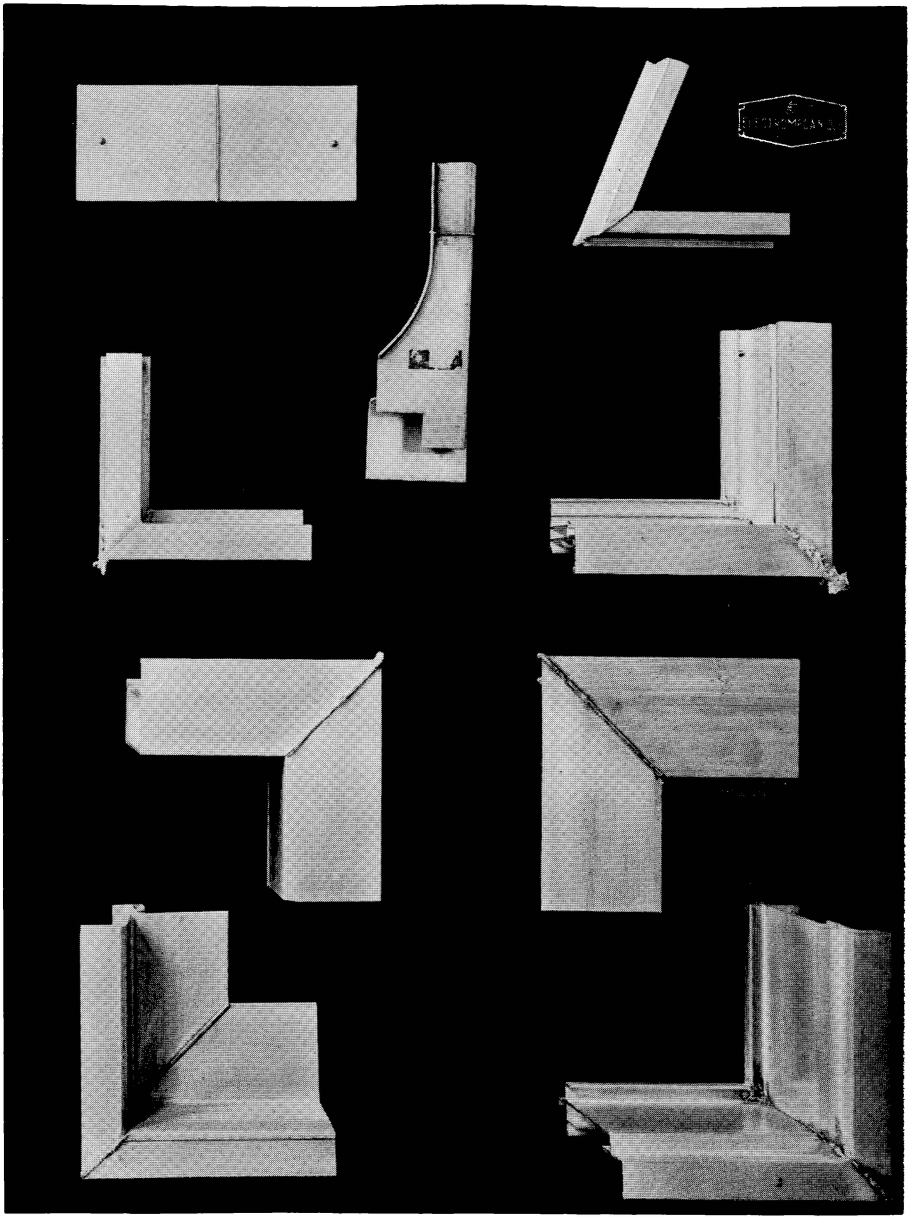


Fig. 412

Quelques échantillons de profils en alliages légers, soudés par étincelage.

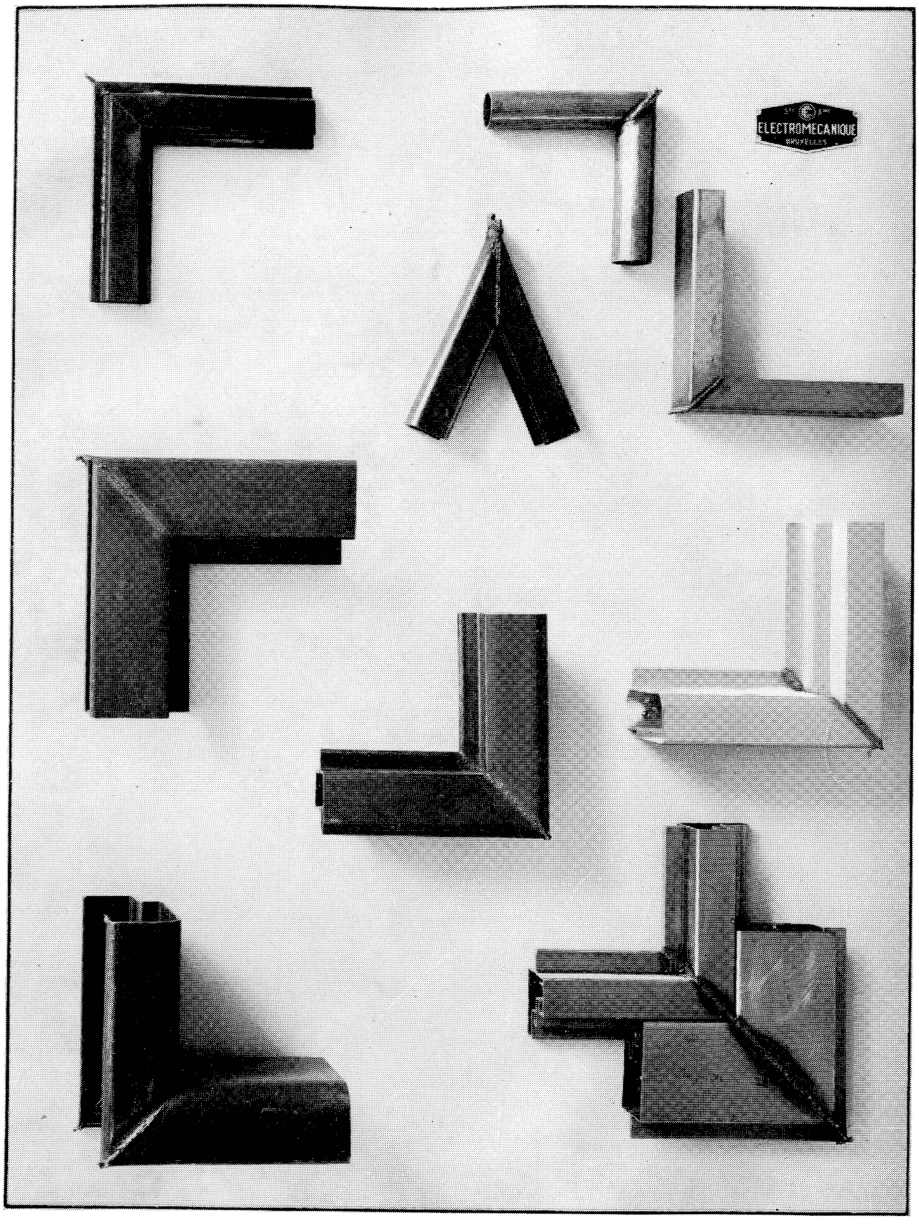


Fig. 413
Quelques échantillons de profils en acier soudés par étincelage.

CHAPITRE VIII

LES SOLUTIONS TRIPHASÉES

Les puissances très élevées que certaines machines à souder monophasées demandent et les inconvénients que cela représente surtout dans les régions et les pays où les sociétés distributrices d'énergie ont des réseaux insuffisants ou déjà surchargés ont conduit à la recherche de solutions triphasées.

Plusieurs systèmes ont été imaginés mais on distingue principalement :

1. Les machines à énergie accumulée.
2. Les systèmes basés sur un changement de la fréquence.
3. Les systèmes à redresseurs.
4. Les branchements spéciaux.

LES MACHINES A ÉNERGIE ACCUMULÉE

L'utilisation de ces machines a presque disparu. Elles furent mises au point pour palier les insuffisances des réseaux ou encore pour pouvoir utiliser les réseaux à courant continu (machines à énergie électro-magnétique). Ce fut le cas des Etats-Unis pendant la seconde guerre mondiale alors que l'industrie devait produire coûte que coûte.

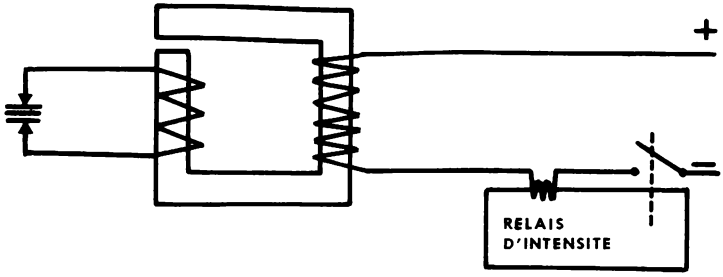


Fig. 414

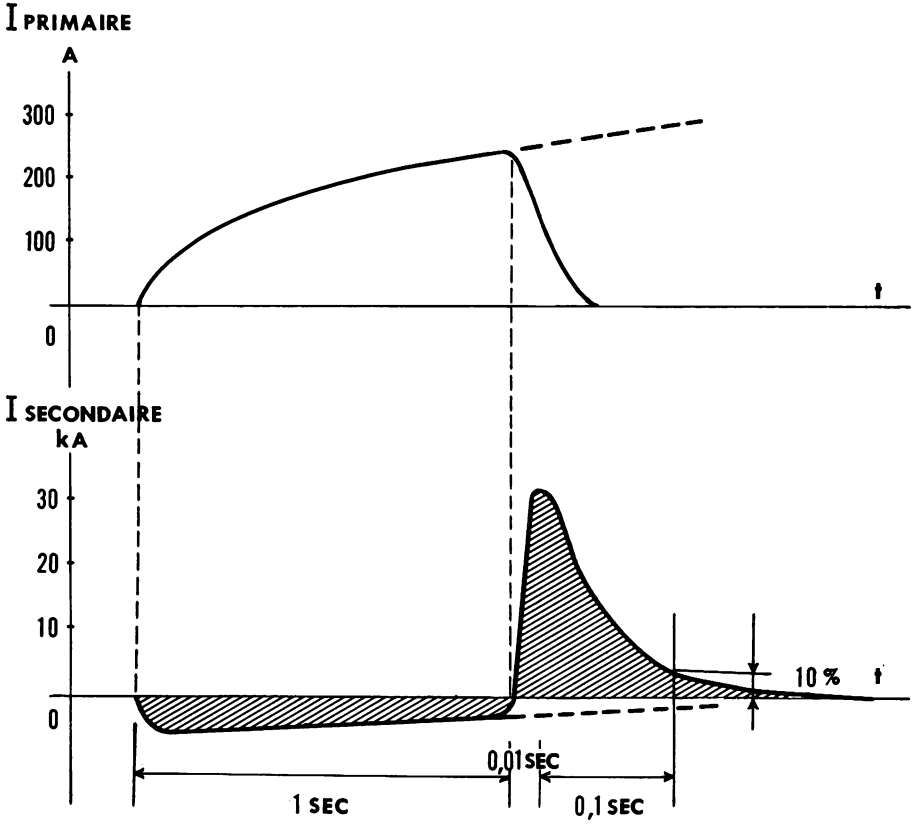


Fig. 415

LES MACHINES A ÉNERGIE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le schéma utilisé est représenté à la figure 414.

Le courant triphasé est transformé en courant redressé, soit par l'intermédiaire d'un moteur-générateur, soit par un redresseur à ignitrons. Ces machines peuvent naturellement être branchées sur un réseau à courant continu. La tension redressée ou celle du réseau continu peut être de 220 V, par exemple. La machine est équipée d'un transformateur à entrefer (pour éviter la saturation) dans lequel une énergie électromagnétique est accumulée durant un temps relativement long et ensuite libérée dans le circuit secondaire en un temps très court, dépendant de la constante de temps du circuit.

La figure 415 donne la variation du courant dans le circuit primaire et le circuit secondaire avec des valeurs donnant un ordre de grandeur.

Lorsque le circuit est mis sous tension, le circuit primaire est parcouru par un courant tendant vers une valeur constante.

Alors que le courant primaire augmente, il induit une tension dans la spire secondaire, tension qui donne lieu à un faible courant secondaire qui s'élève très rapidement pour baisser ensuite lentement et tendre vers zéro.

Ce courant secondaire induit n'est pas nuisible. Au contraire, il sert à préchauffer les pièces à souder ce qui est même requis dans certains cas de soudage (par exemple les aciers trempants ou les alliages légers). Il favorise l'accostage des pièces et des électrodes.

A chaque valeur instantanée du courant primaire correspond une énergie accumulée :

$$W = \int_0^I i \mathrm{d}\,(\mathcal{L}i).$$

Par un relais d'intensité on peut provoquer, pour une intensité primaire bien déterminée, l'ouverture rapide du circuit ce qui aura pour effet d'induire un courant intense dans le circuit secondaire qui après avoir atteint une valeur élevée chute exponentiellement vers zéro.

La figure 415 mentionne à titre indicatif un ordre de grandeur des temps de charge et de décharge.

Il faut attirer l'attention sur le fait que de nombreuses précautions doivent être prises pour assurer une coupure rapide du circuit et il faut à cet effet disposer de contacteurs spéciaux qui évitent la formation d'un arc dans lequel se dissiperait l'énergie que l'on veut faire passer au circuit secondaire.

Un autre désavantage réside dans le volume et le poids relativement important du circuit magnétique.

Le système décrit ci-dessus n'est valable que pour des machines à souder par point et ne peut être appliqué au soudage au galet et en bout puisque l'on ne peut obtenir qu'une seule impulsion de courant.

Le temps de charge limite également la cadence de travail.

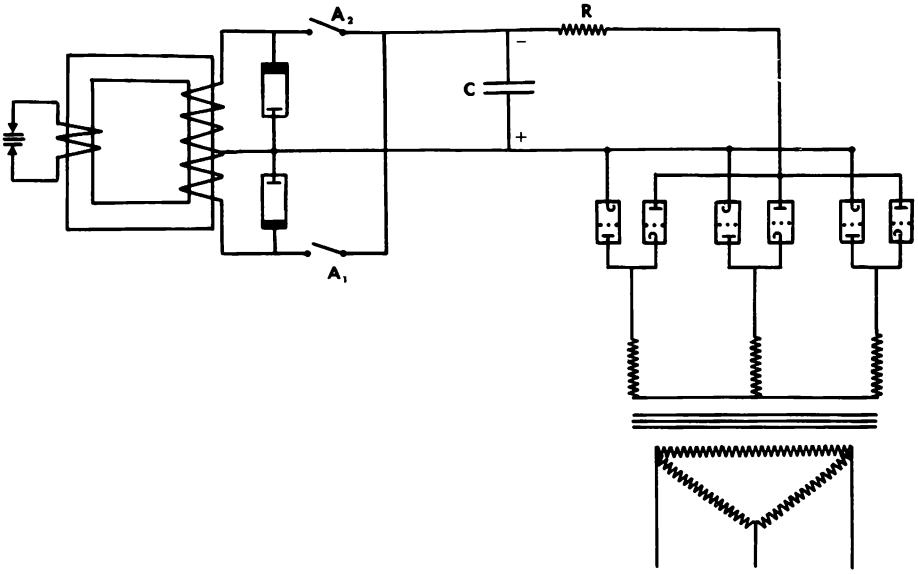


Fig. 416

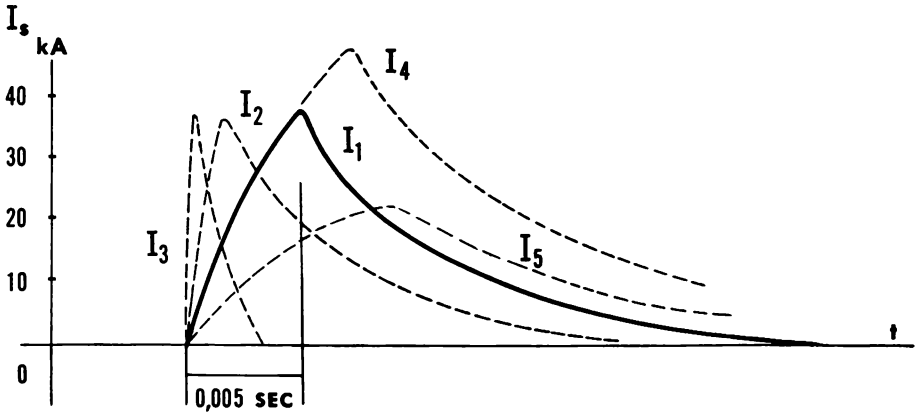


Fig. 417

LES MACHINES A ÉNERGIE ÉLECTROSTATIQUE

Dans le cas présent l'énergie est accumulée dans des condensateurs avant d'être dissipée dans le circuit de soudage.

Afin de pouvoir accumuler une quantité d'énergie élevée sous un volume relativement peu encombrant de condensateurs, on choisit une tension élevée $\left(W = \frac{CE^2}{2}\right)$ soit en pratique une tension de mille à quelques milliers de volts.

Cette particularité implique que la tension triphasée du réseau soit préalablement élevée par un transformateur.

Ensuite il faut disposer d'un système redresseur (généralement à thyratrons). Le schéma de principe est repris à la figure 416.

Les condensateurs C sont chargés au travers d'une résistance R destinée à limiter l'intensité.

Au moment où l'on provoque la fermeture du contacteur A1 on bloque le fonctionnement du redresseur à thyratrons en agissant sur leur tension de grille.

Les condensateurs se déchargent dans le bobinage primaire du transformateur et induisent un courant secondaire dont la forme est reprise figure 417. On enclenche alternativement le contacteur A1 et le contacteur A2 dans le but d'éviter une saturation du transformateur.

Afin d'éviter l'apparition d'une tension inverse aux bornes des condensateurs au cours de la décharge, il est nécessaire de placer en parallèle avec les bobinages primaires des ignitrons que l'on allume au moment où la tension inverse tend à apparaître.

A cet instant également on commande le fonctionnement du redresseur et la recharge des condensateurs.

Les machines à énergie électrostatique accumulée présentent l'avantage d'absorber lentement du réseau l'énergie nécessaire à la soudure.

On peut atteindre en pratique un rapport de 10 à 1 entre la puissance monophasée nécessaire à l'exécution d'une soudure et la puissance triphasée nécessaire pour alimenter une machine à condensateurs réalisant le même travail. Les machines à souder décrites ci-dessus ont été et sont encore utilisées pour le soudage d'alliages légers. Le système par décharge de condensateurs permet d'obtenir des temps très courts par exemple de l'ordre de 0,002 seconde ce qui représente 1/5 du temps d'une alternance d'un courant de 50 Hz.

Le système permet des réglages très précis et l'on peut agir, sur la tension redressée, sur le nombre de spires des bobinages primaires, sur la valeur des capacités, pour obtenir différentes allures de courbes représentées I_2, I_3, I_4, I_5 à la figure 417.

Les machines à souder par percussion sont également des machines à accumulation d'énergie électrostatique, mais la technique du soudage par percussion est différente. Le soudage par percussion est un procédé de soudage en bout. La décharge des condensateurs reliés directement aux pièces crée un arc électrique qui provoque la fusion très superficielle des pièces.

Un forgeage rapide permet d'unir les pièces.

L'inconvénient des machines à énergie électrostatique réside dans leur coût élevé (redresseur et condensateurs) et dans les précautions spéciales qu'il y a lieu de prendre en matière d'isolation vu les tensions élevées aux bornes des condensateurs.

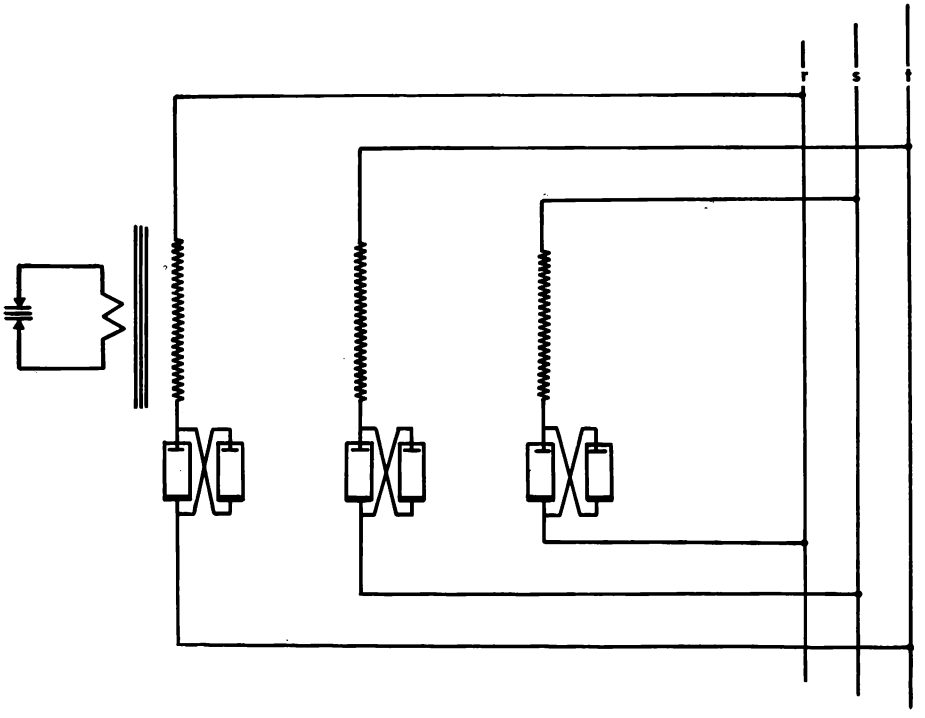


Fig. 418

LES SYSTÈMES BASÉS SUR UN CHANGEMENT DE FRÉQUENCE

Le principe de ce système est représenté figure 418.

Trois enroulements primaires sont placés sur le même circuit magnétique. Ils sont connectés en triangle et contrôlés chacun par un contacteur à ignitrons.

Le circuit secondaire ne comprend qu'une seule spire.

On conçoit que l'on puisse commander l'allumage des ignitrons dans un ordre tel que pendant plusieurs alternances le courant passant dans les trois enroulements produise un flux magnétique dans le même sens. On peut ainsi obtenir au secondaire un courant de fréquence inférieure à la fréquence du réseau 50 Hz.

L'opération consiste donc à transformer un courant triphasé 50 Hz en un courant monophasé à basse fréquence.

Un exemple d'une telle transformation est donné figure 419 où l'on transforme du 50 Hz triphasé en 10 Hz monophasé. Une combinaison très courante se trouve être 16 2/3 Hz.

Avant d'exposer les avantages du système, remarquons immédiatement qu'il n'équilibre pas les phases puisque les appels de courant sur les trois phases sont successifs.

Mais il est certain qu'intégrée sur un certain temps, la charge est égale sur les trois phases.

L'intérêt qu'il y a à réduire la fréquence se déduit de la formule de l'impédance.

$$Z = \sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}, \text{ où } \omega = 2\pi f.$$

Il s'ensuit que comme $\mathcal{L}\omega$ est moins important, le facteur de puissance sera plus élevé qu'un soudage monophasé.

Les masses magnétiques introduites dans le circuit secondaire ont moins d'influence sur la valeur de l'impédance secondaire puisque la fréquence est moins élevée.

Le déphasage du point d'allumage des ignitrons permet de façonner la courbe du courant secondaire et de l'adopter aux matériaux à souder.

Il faut également mentionner la régularité du développement de l'énergie, régularité qui peut suivre une courbe bien déterminée grâce à de nombreux perfectionnements qui ont été introduits dans la commande électronique. Ce développement progressif et contrôlé de l'énergie calorifique dans les pièces à souder, contraste avec le dégagement pulsé que l'on obtient avec les solutions monophasées.

C'est une des raisons pour lesquelles le soudage basse fréquence s'adapte mieux au soudage par point des alliages légers car l'on réalise le point en une impulsion.

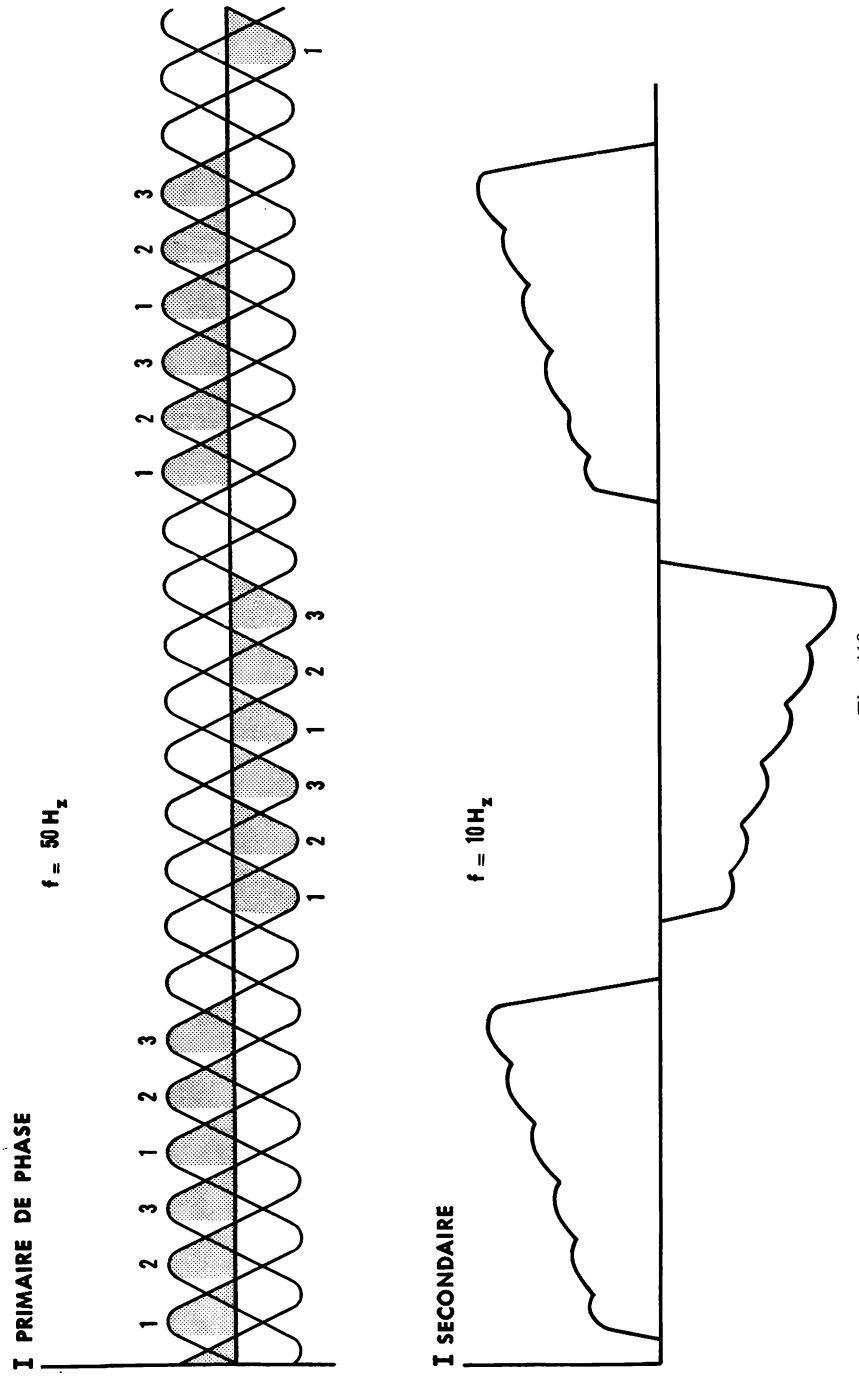

I PRIMAIRE DE PHASE
f = 50 Hz
1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1
I SECONDAIRE
f = 10 Hz

Fig. 419

Comme inconvénients, il faut mentionner la complexité et le coût de ce système qui exige un transformateur de fortes dimensions puisque la fréquence est basse. C'est la raison pour laquelle on ne descend pratiquement jamais en dessous de 16 2/3, ce qui requiert déjà une section du circuit magnétique trois fois plus importante que pour une fréquence de 50 Hz.

Il faut attirer l'attention sur un dernier inconvénient : l'inversion du sens de l'onde secondaire ne peut se faire immédiatement. L'énergie électromagnétique accumulée par le transformateur doit auparavant être dissipée car on obtiendrait pratiquement un court-circuit. Des perfectionnements complexes ont d'ailleurs été apportés aux dispositifs de commande électronique pour faciliter cette inversion.

Le procédé est applicable au soudage par point et au soudage au galet, mais non au soudage en bout.

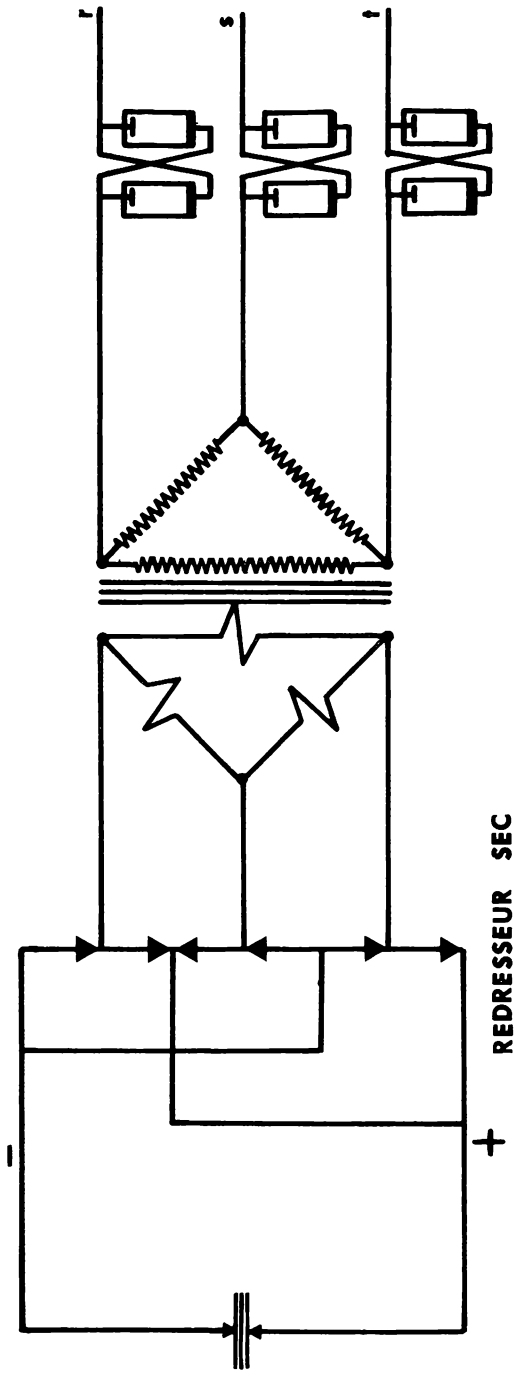


Fig. 420

LES MACHINES A REDRESSEURS

Les machines de ce type sont équipées d'un transformateur de soudage triphasé dont les secondaires sont le plus souvent connectés en triangle. Ils sont raccordés à un redresseur sec débitant dans le circuit de soudage. Les redresseurs secs habituellement employés pour le soudage par résistance sont des redresseurs Magnésium-sulfure de cuivre.

Le schéma de principe se présente sous la forme indiquée à la figure 420. On voit immédiatement que les redresseurs permettent le redressement des deux alternances de courant et examinons d'abord sommairement ce qui se passe en état de régime en supposant que les redresseurs soient parfaits.

Remarquons qu'il n'y a jamais qu'une phase débitant à travers le redresseur, celle où la tension est la plus élevée.

Traçons la variation des tensions des trois phases (fig. 421) dans le temps. Nous obtenons trois réseaux de sinusoïdes que nous repérons 1-2-3.

Traçons également en trait pointillé les demi-sinusoïdes obtenues en redressant les demi-sinusoïdes négatives, et repérons les 1'-2'-3'. Les parties en trait renforcé des six réseaux de demi-sinusoïdes ainsi obtenues correspondent à la conduction des différentes phases.

Si nous partons de la phase 1 nous voyons que les phases secondaires débitent dans l'ordre suivant, chacune pendant un laps de temps correspondant à 60° électrique ou à 1/6 de période :

1 - 3' - 2 - 1' - 3 - 2', etc.

En admettant que la résistance du circuit de soudage soit constante et le rôle de la self négligeable, le courant circulant dans le circuit de soudage aura une forme semblable à celle de la tension secondaire redressée. Les courants circulant dans les diverses phases sont repris à la figure 421. On constate que les charges en ligne ne sont équilibrées que si l'on intègre sur un certain temps.

Calculons la valeur efficace du courant secondaire redressé par rapport au courant alternatif maximum qui circulerait dans un circuit de résistance dépourvu de réactance.

On sait par définition que

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\int_0^t \frac{i^2 \, \mathrm{d}t}{t}}$$

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{I^2_{\max}}{t} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{\sin^2 \omega t . \mathrm{d}\, \omega t}{\omega}} = \sqrt{\frac{I^2_{\max}}{\omega t} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin^2 \omega t . \mathrm{d}\, \omega t}$$

$$= I_{\max} \sqrt{\frac{\left[-\frac{1}{4} \sin 2\,\omega t + \frac{1}{2}\,\omega t \right]_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}}}{\frac{\pi}{3}}}$$

$$= I_{\max} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \times \frac{3}{\pi} \times 2\sqrt{\frac{3}{4}}} = 0{,}995\ I_{\max}.$$

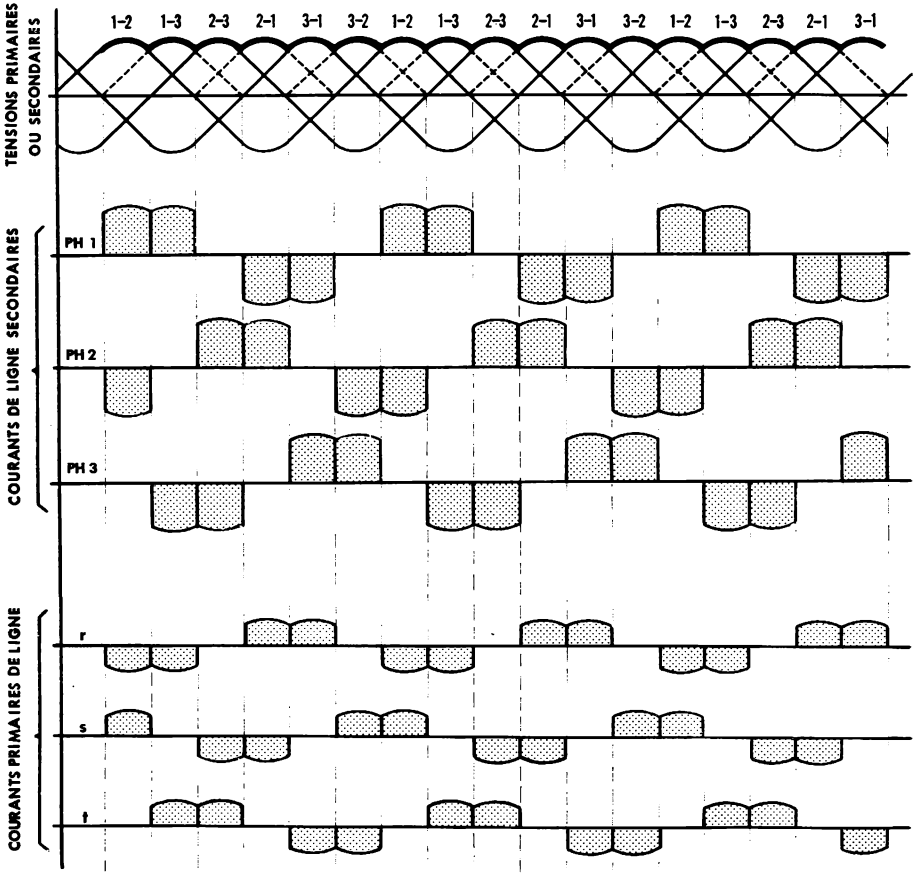

TENSIONS PRIMAIRES OU SECONDAIRES
1-2 1-3 2-3 2-1 3-1 3-2 1-2 1-3 2-3 2-1 3-1 3-2 1-2 1-3 2-3 2-1 3-1
COURANTS DE LIGNE SECONDAIRES
PH 1
PH 2
PH 3
COURANTS PRIMAIRES DE LIGNE
r
s
t

Fig. 421

La valeur efficace du courant circulant dans les secondaires, vaut puisqu'il y circule deux tiers du temps :

$$I_{s\ \text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{\text{eff}} = 0{,}817\ I_{\text{eff}}\,.$$

Nous avons supposé au début que le circuit secondaire était uniquement résistant ce qui n'est pas le cas et la self du secondaire joue d'ailleurs un rôle favorable dans le nivellement des pointes de courant dues à la forme pulsatoire de la tension appliquée.

La tension pulsée appliquée au secondaire à travers les redresseurs peut être décomposée en une tension continue moyenne et une tension périodique dont le terme fondamental a une fréquence de $6 \times 50 = 300$ Hz.

Si l'on considère que, d'une part, l'amplitude de la tension périodique ne dépasse pas 5 à 6 % de la valeur moyenne et que d'autre part, la réactance du secondaire pour une fréquence égale à 300 Hz est souvent de l'ordre de 15 à 20 fois sa résistance, on conclut que l'importance du courant périodique superposé au courant dû uniquement à la tension moyenne continue est négligeable par rapport à celui-ci.

Dès lors, on peut considérer le courant secondaire comme engendré par une tension continue appliquée à un circuit comportant résistance et réactance.

La constante de temps de circuit secondaire peut varier dans d'assez larges limites, mais reste toujours très faible (de l'ordre de 0,005 à 0,015 s).

Voyons à présent les nombreux avantages du système.

a) Equilibre des phases dans le temps.

b) Facteur de puissance de 0,9 environ ce qui fait, chose inattendue, que la machine à souder contribue à relever le facteur de puissance d'une installation. Le système triphasé redressé donne, au point de vue facteur de puissance, des résultats supérieurs à ceux du système triphasé basse fréquence.

c) L'indépendance quasiment complète des performances d'une machine à souder par rapport à la longueur des bras et à l'écartement entre bras.

d) L'influence pratiquement nulle de l'introduction de masses magnétiques entre les bras.

Ces masses influent bien sur la constante de temps mais cette influence est négligeable vis-à-vis de celle relevée sur des machines monophasées ordinaires.

e) La possibilité de souder des matériaux très différents, tels l'acier et les alliages légers, la variation de la résistance de contact et de la résistance du matériau étant suffisante pour faire varier le courant secondaire dans de fortes proportions.

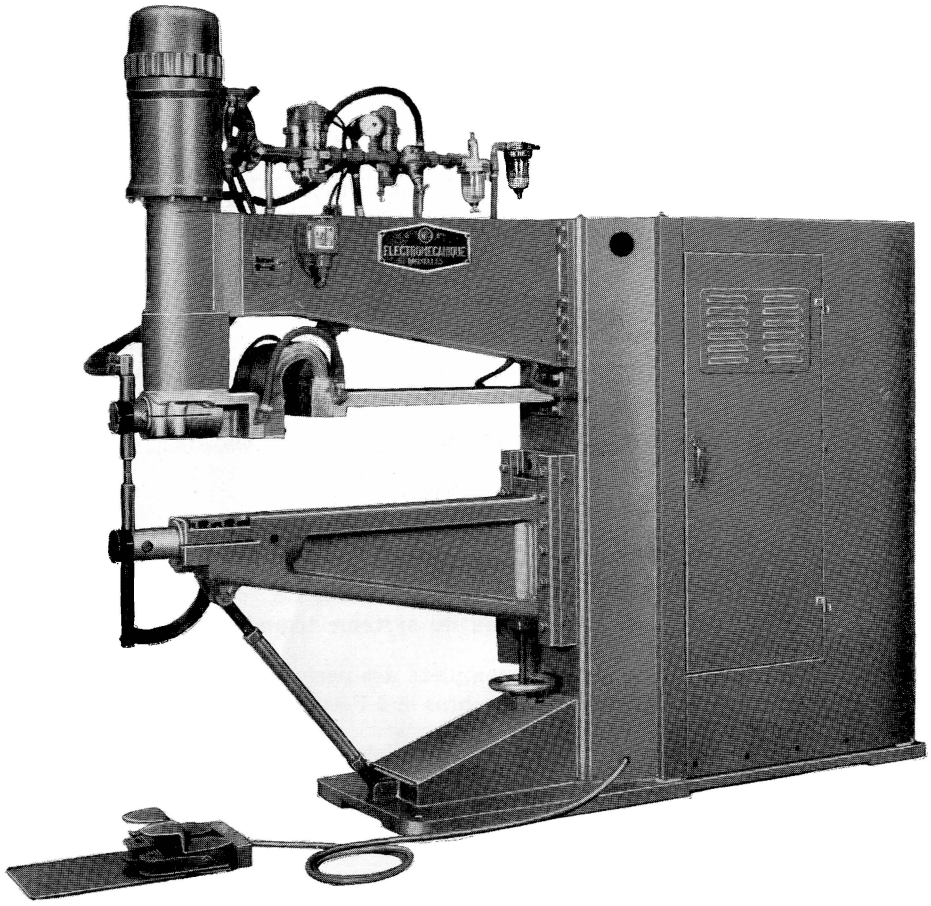


Fig. 422
Machine à souder triphasée à redresseur sec.

f) La moins grande importance du shuntage par les points de soudure voisins, puisque la résistance moins élevée due au shuntage appelle automatiquement un courant de soudage plus important.

g) La souplesse du système qui permet l'emploi d'appareils de commande

— à simple contacteur tripolaire

— à 4 tubes ignitrons

— à 6 tubes ignitrons.

Cette caractéristique est un avantage, par rapport aux solutions basse fréquence qui nécessitent toujours un appareil électronique complexe et coûteux.

h) L'application de ce système à une machine à souder au galet permet de souder à des vitesses très élevées puisque l'énergie calorifique développée est constante alors qu'en courant alternatif, cette énergie passe périodiquement par 0 à chaque alternance.

La figure 422 montre une machine à souder triphasée à redresseur sec.

BRANCHEMENTS SPÉCIAUX

LE BRANCHEMENT SCOTT

Lorsqu'une usine est suffisamment importante pour disposer d'un réseau monophasé destiné uniquement à l'alimentation des machines à souder on peut penser d'équiper la sous-station de transformateurs couplés, selon le principe Scott.

Rappelons le schéma de principe (fig. 423) qui prévoit l'usage de deux circuits magnétiques.

Les tensions récoltées aux côtés secondaires sont déphasées de 90°.

Ce système permet d'équilibrer parfaitement le réseau triphasé si l'on charge simultanément les deux réseaux secondaires (E_1 et E_2).

Par contre si l'on alimente une seule charge par la tension E on déséquilibre le réseau triphasé primaire.

Un choix judicieux du nombre de spires primaires et secondaires permet d'atténuer cet effet et d'obtenir par exemple une charge répartie de la façon suivante :

1 - ½ - ½

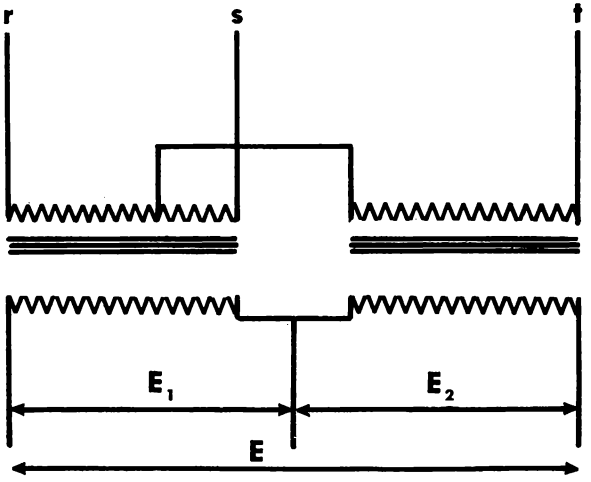


Fig. 423

ÉQUILIBRAGE ET COMPENSATION D'UNE CHARGE MONOPHASÉE SUR UN RÉSEAU TRIPHASÉ

On sait qu'une charge monophasée a une puissance instantanée fluctuante. Dans le cas d'un circuit inductif on a en effet :

$$\begin{aligned} p = e.i. &= E_m I_m \sin \omega t . \sin (\omega t - \varphi) \\ &= \frac{E_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos (2 \omega t - \varphi)] \\ &= EI \cos \varphi - EI \cos (2 \omega t - \varphi). \end{aligned}$$

Dans le cas de la puissance d'une charge triphasée, on fait la somme de trois charges monophasées placées entre phases différentes et l'on obtient :

$$p = 3 EI \cos \varphi$$

car les seconds termes de l'équation précédente s'annulent puisque décalés de 120°.

La puissance instantanée absorbée par un récepteur triphasé est donc constante.

Nous en tirons la conclusion que, pour qu'une charge monophasée équilibre le réseau triphasé, il faut que la puissance absorbée instantanée soit rendue constante, c'est-à-dire que le terme cos (2 $\omega t - \varphi$) soit annulé par les puissances fluctuantes de capacités et inductances branchées d'une façon adéquate.

Une inductance ou une capacité absorbent une puissance essentiellement fluctuante.

En effet :

$$\begin{aligned} p_{\text{induct.}} &= E_m I_m \sin \omega t . \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ &= EI \cos \left(- \frac{\pi}{2} \right) - EI \cos \left(2 \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= - EI \cos \left(2 \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

et de même

$$p_{\text{cond}} = - EI \cos \left(2 \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

soit d'une façon générale

$$p_{\text{induct. cond}} = - EI \cos \left(2 \omega t \pm \frac{\pi}{2} \right).$$

Si nous alimentons une inductance ou une capacité par une tension E' décalée en avant d'un angle Φ par rapport à E et en représentant l'intensité par I' on obtient :

$$\begin{aligned} p' &= \frac{E'_m I'_m}{2} \sin (\omega t + \Phi) . \sin \left(\omega t + \Phi \pm \frac{\pi}{2} \right) \\ &= - E' I' \cos \left(2 \omega t + 2 \Phi \pm \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

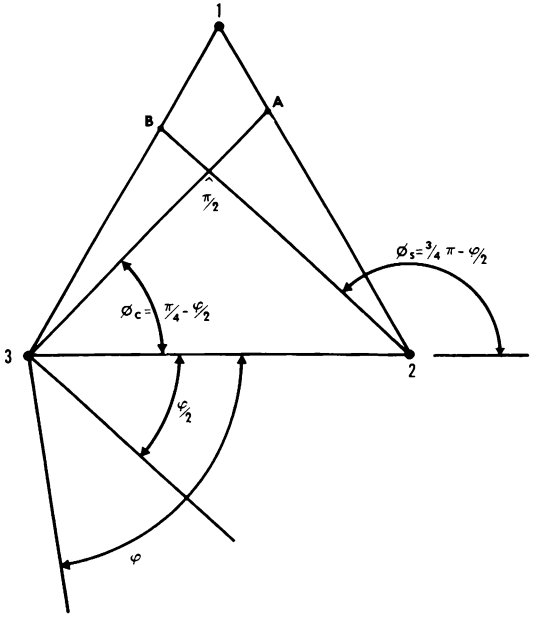


Fig. 424

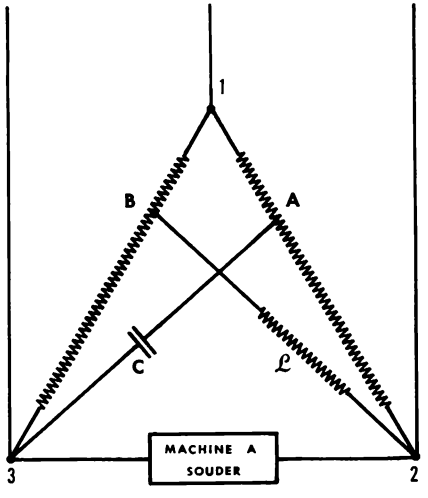


Fig. 425

Pour que la puissance instantanée absorbée par le système machine + inductance ou machine + capacité soit constante, il faut que la somme des puissances fluctuantes soit égale à 0, ce que nous écrivons :

$$— EI \cos (2\,\omega t — \varphi) — E' I' \cos \left(2\,\omega t + 2\,\Phi \pm \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

Pour que cette équation se vérifie, il faut :

1° que $$EI = E' I'$$

et nous savons que dans le cas d'une inductance

$$E' I' = \mathcal{L}\,\omega\, I'^2$$

et dans le cas d'une capacité

$$E' I' = C\,\omega\, E'^2.$$

2° que les sinusoïdes soient décalées de π degrés ce que nous écrivons

$$\left(2\,\omega t + 2\,\Phi \pm \frac{\pi}{2}\right) — (2\,\omega t — \varphi) = \pi$$

d'où

$$\Phi = \frac{3}{4}\,\pi — \frac{\varphi}{2} \text{ pour une inductance}$$

$$\Phi = \frac{\pi}{4} — \frac{\varphi}{2} \text{ pour une capacité.}$$

On peut donc obtenir l'équilibrage par l'emploi d'une inductance ou d'une capacité. L'équilibrage n'est toutefois intéressant, que si le facteur de puissance est ramené égal à l'unité, ce qui implique l'utilisation combinée d'inductance et de capacité.

Pour que le facteur de puissance soit égal à 1, il faut que la puissance réactive du système entier s'annule. Cette condition s'écrit :

$$EI \sin \varphi = E'_c\, I'_c \sin \left(+\frac{\pi}{2}\right) + E'_s\, I'_s \sin \left(-\frac{\pi}{2}\right)$$

$$EI \sin \varphi = E'_c\, I'_c — E'_s\, I'_s$$

ou

$$EI \sin \varphi = C\,\omega\, E'^2_c — \mathcal{L}\,\omega\, I'^2_s.$$

Comme, d'autre part, pour obtenir équilibrage, il fallait que :

$$EI = E'_c\, I'_c + E'_s\, I'_s$$

$$EI = C\,\omega\, E'^2_c + \mathcal{L}\,\omega\, I'^2_s.$$

On déduit :

$$C\,\omega\, E_c^2 = \frac{EI}{2}\,(1 + \sin \varphi)$$

$$\mathcal{L}\,\omega\, I^2_s = \frac{EI}{2}\,(1 — \sin \varphi).$$

Le diagramme des vecteurs correspondants est donné figure 424.

La machine monophasée est branchée entre 2 et 3 (fig. 425). Le courant I est déphasé d'un angle φ.

A-3 correspond à l'inclinaison que doit avoir le vecteur E'_c et le vecteur B2 représente la tension à appliquer à la self.

On peut dès lors calculer soit graphiquement soit analytiquement la valeur des vecteurs E'_c et E'_s.

On calcule ensuite la valeur

$$\text{de } C = \frac{EI}{2\,\omega\,E'^2_c}\,(1 + \sin\varphi)$$

$$\text{et de } \mathcal{L} = \frac{2\,E'^2_s}{\omega\,EI\,(1 - \sin\varphi)}.$$

Les tensions A1, A2, B1, B2 s'obtiennent par autotransformateurs.

En pratique on notera qu'un tel système est très coûteux et qu'il ne se justifie que pour les puissances monophasées excessivement élevées absorbées pendant des temps relativement longs.

Tel est le cas de certaines machines à souder en bout pour lesquelles le système a été appliqué mais il faut noter encore que dans le cas de machines à souder la puissance absorbée varie au cours de l'opération, ce qui ne permet pas d'équilibrer parfaitement.

CHAPITRE IX

LE BRANCHEMENT DES MACHINES A SOUDER ET LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN SOUDAGE

LE BRANCHEMENT DES MACHINES A SOUDER

Le raccordement des machines à souder par résistance au réseau d'alimentation doit être réalisé en tenant compte de leurs caractéristiques spéciales, très différentes de celles des machines électriques courantes. En effet, une machine à souder par résistance ne fonctionne le plus souvent que par intermittence pour ce qui est de son circuit électrique de puissance.

Pour fixer les idées, l'utilisation du circuit de puissance peut être

— de 10 à 25 % du temps pour une machine à souder au point;
— de 10 à 50 % du temps pour une machine à souder en bout;
— de 30 à 100 % du temps pour une machine à souder au galet.

DÉFINITION

Pour la bonne compréhension du texte, il y a lieu de connaître les quelques définitions suivantes, relatives au circuit de puissance d'une machine à souder par résistance.

COURANT PRIMAIRE PERMANENT

Courant primaire de ligne pouvant être absorbé en permanence par le transformateur de la machine, réglé en position maximum, sans engendrer d'échauffements supérieurs à ceux permis par les normes pour la classe d'isolants du cas.

Il est représenté par :

$$I_{p\ 100\ \%}.$$

COURANT PRIMAIRE MAXIMUM

Courant primaire de ligne, le plus élevé qu'absorbe une machine alimentée sous sa tension nominale, son circuit secondaire de soudage étant réglé de façon à présenter le minimum d'impédance, les électrodes étant court-circuitées.

Il est représenté par :

$$I_{p\,max}.$$

FACTEUR DE MARCHE

Rapport de la durée de fonctionnement en charge à la durée du cycle complet de l'opération. Ce rapport, compris entre 0 et 1, s'exprime en %.

Il est représenté par :

$$F.M.$$

PUISSANCE APPARENTE AU F.M. DE 100 %

Puissances déterminées par les formules suivantes :

pour une machine monophasée :

$$P_{100\ \%} = U \times I_{p\ 100\ \%}$$

pour une machine triphasée :

$$P_{100\ \%} = \sqrt{3} \times U \times I_{p\ 100\ \%}$$

U étant la tension nominale d'alimentation de la machine à souder.

PUISSANCE APPARENTE CONVENTIONNELLE AU F.M. DE 50 %

Cette puissance, qui sert surtout de terme de comparaison entre transformateurs, se définit comme suit :

— Puissance apparente susceptible d'être absorbée par le transformateur, alimenté sous sa tension nominale, en position maximum de réglage, au facteur de marche de 50 %; sans que les échauffements ne dépassent les limites permises par les normes pour la classe d'isolants du cas.

Le cycle de travail à considérer est de une minute, avec 30 secondes de mise en charge et 30 secondes de repos complet.

Elle est représentée par :

$$P_{50\,\%}.$$

On a approximativement la relation :

$$P_{50\,\%} = 1{,}41 \times P_{100\,\%}.$$

PUISSANCE APPARENTE MAXIMUM

— Puissance déterminée par les formules suivantes :

pour une machine monophasée :

$$P_{\max.} = U \times I_{p\,\max.}$$

pour une machine triphasée :

$$P_{\max.} = \sqrt{3} \times U \times I_{p\,\max.}$$

PUISSANCE APPARENTE TOTALE MAXIMUM

— Puissance réellement demandée aux bornes du transformateur d'alimentation. Elle comprend la puissance apparente maximum de la machine plus la perte de puissance dans les câbles d'alimentation, plus éventuellement la perte de puissance dans les ignitrons de l'appareil de contrôle électronique.

— Cette puissance est déterminée par les formules suivantes :

pour une machine monophasée montée avec contacteur :

$$P_{\text{tot. max.}} = 1{,}04\ U \times I_{p\,\max.}$$

pour une machine monophasée montée avec ignitrons :

$$P_{\text{tot. max.}} = 1{,}04\ (U + 20) \times I_{p\,\max.}$$

pour une machine triphasée montée avec contacteur :

$$P_{\text{tot. max.}} = 1{,}04 \times \sqrt{3} \times U \times I_{p\,\max.}$$

pour une machine triphasée montée avec ignitrons :

$$P_{\text{tot. max.}} = 1{,}04 \times \sqrt{3} \times (U + 20) \times I_{p\,\max.}$$

Le coefficient 1,04 découle de l'étude des câbles d'alimentation (voir page 461).

Le terme $(U + 20)$ tient compte d'une chute de tension de 20 V dans les ignitrons.

On détermine de façon analogue $P_{\text{tot. }100\,\%}$ et $P_{\text{tot. }50\,\%}$.

Illustrons ces diverses définitions par quelques exemples

Exemple I :

— Machine à souder au point monophasée, montée avec contacteur :

U	= 220 V
Cos φ en soudage	= 0,5
$I_{p\ 100\ \%}$	= 160 A
$I_{p\ max.}$	= 850 A
$P_{100\ \%}$	= 220 × 160 = 35 kVA
$P_{50\ \%}$	= 35 × 1,41 = 50 kVA
$P_{max.}$	= 220 × 850 = 187 kVA.

— Puissances totales :

Machines à souder + câbles = 1,04 × valeurs précédentes.

Exemple II :

Machine à souder au galet monophasée montée avec ignitrons :

U	= 200 V (chute de 20 V dans les ignitrons de l'appareil électronique de contrôle).
Cos φ en soudage	= 0,6
$I_{p\ 100\ \%}$	= 600 A
$I_{p\ max.}$	= 1 120 A

— Machine à souder	$P_{100\ \%}$	= 200 × 600 = 120 kVA
	$P_{50\ \%}$	= 120 × 1,41 = 169 kVA
	$P_{max.}$	= 200 × 1 120 = 224 kVA
— Machine à souder + appareil électronique	$P_{100\ \%}$	= 220 × 600 = 132 kVA
	$P_{50\ \%}$	= 132 × 1,41 = 186 kVA
	$P_{max.}$	= 220 × 1 120 = 246 kVA

— Puissances totales :

Machines à souder + Appareil électronique + câbles = 1,04 × valeurs précédentes.

Exemple III :

— Machine à souder en bout monophasée montée avec contacteur :

U	= 380 V
Cos φ en soudage	= 0,8
$I_{p\ 100\ \%}$	= 160 A
$I_{p\ max.}$	= 510 A
$P_{100\ \%}$	= 380 × 160 = 61 kVA
$P_{50\ \%}$	= 61 × 1,41 = 86 kVA
$P_{max.}$	= 510 × 380 = 194 kVA

— Puissances totales :

Machine à souder + câbles = 1,04 × valeurs précédentes.

Exemple IV :

— Machine à souder au point triphasée, montée avec ignitrons :

U = 200 V (20 V de chute dans les ignitrons de l'appareil électronique).

Cos φ en soudage = 0,95

$I_{p\,100\,\%}$ = 220 A

$I_{p\,max.}$ = 800 A

— Machine à souder :

$P_{100\,\%} = \sqrt{3} \times 200 \times 220 = 76$ kVA

$P_{50\,\%} = 76 \times 1{,}41 = 107$ kVA

$P_{max.} = \sqrt{3} \times 200 \times 800 = 277$ kVA

— Machine à souder + appareil électronique :

$P_{100\,\%} = \sqrt{3} \times 220 \times 220 = 84$ kVA

$P_{50\,\%} = 84 \times 1{,}41 = 118$ kVA

$P_{max.} = \sqrt{3} \times 220 \times 800 = 305$ kVA

— Puissances totales :

Machines à souder + Appareil électronique + câbles = 1,04 × valeurs précédentes.

Exemple V :

— Presse à souder d'émaillerie, monophasée montée avec ignitrons :

U = 200 V (20 V de chute dans les ignitrons de l'appareil électronique de contrôle).

Cos φ en soudage = 0,55

$I_{p\,100\,\%}$ = 300 A

$I_{p\,max.}$ = 2 600 A

— Machine à souder :

$P_{100\,\%} = 200 \times 300 = 60$ kVA

$P_{50\,\%} = 60 \times 1{,}41 = 84{,}5$ kVA

$P_{max.} = 200 \times 2\,600 = 520$ kVA

— Machine à souder + appareil électronique :

$P_{100\,\%} = 220 \times 300 = 66$ kVA

$P_{50\,\%} = 66 \times 1{,}41 = 93$ kVA

$P_{max.} = 220 \times 2\,600 = 572$ kVA

— Puissances totales :

Machine à souder + Appareil électronique + câbles = 1,04 × valeurs précédentes.

DÉTERMINATION DE LA SECTION MINIMUM DES CABLES DE RACCORDEMENT D'UNE MACHINE A SOUDER PAR RÉSISTANCE

(Critère : Echauffement des câbles en cuivre)
Câbles isolés sous caoutchouc

Sections standardisées des câbles en mm²	Câbles à 1 conducteur		Câbles à 2 conducteurs		Câbles à 3 conducteurs	
	Intensité primaire maximum admissible en ampères à		Intensité primaire maximum admissible en ampères à		Intensité primaire maximum admissible en ampères à	
	100 % d'utilisation	50 % d'utilisation	100 % d'utilisation	50 % d'utilisation	100 % d'utilisation	50 % d'utilisation
6	31	44	28	39	26	37
10	43	61	38	54	35	49
16	75	106	65	92	55	78
25	100	141	88	124	73	103
35	125	177	110	155	90	127
50	160	226	140	198	115	163
70	200	283	175	248	140	198
95	240	339	210	297	170	240
120	280	396	245	346	200	283
150	325	460	280	396	230	325
185	380	537	320	452	270	382
240	450	636	380	537	315	445
310	525	742	—	—	—	—
400	640	905	—	—	—	—
500	760	1 075	—	—	—	—
625	880	1 244	—	—	—	—
800	1 050	1 485	—	—	—	—
1 000	1 250	1 770	—	—	—	—

DÉTERMINATION DES CABLES D'ALIMENTATION

Les câbles de raccordement doivent satisfaire aux deux conditions suivantes :

— supporter l'échauffement produit par le passage du courant;

— limiter la chute de tension entre la source d'alimentation et la machine à souder à une valeur acceptable. Nous conseillons de limiter la partie ohmique de cette chute de tension à un maximum de 4 % de la tension nominale d'alimentation. (Le facteur de puissance de câbles correctement placés dépasse 0,9, ce qui permet de négliger la partie réactive de la chute de tension).

La valeur $I_{p\,100\,\%}$ déterminera la section minimum à prévoir. Celle-ci sera déduite du tableau de la page 460 et répondra au premier critère (échauffement).

La section trouvée sera vérifiée au moyen de l'abaque de la page 462 ou 463, selon qu'il s'agira d'une machine monophasée ou d'une machine triphasée. La valeur du courant à prendre en considération pour cette vérification sera $I_{p\,max.}$, sauf pour les machines à souder par étincelage où l'on prendra 50 % de la valeur de $I_{p\,max.}$ au refoulement. Cette façon de faire se justifie par la courte durée du passage du courant de court-circuit et l'allure de la courbe I — temps de soudage (fig. 366, page 383).

La règle normale doit néanmoins être appliquée pour les machines à touches de préchauffage.

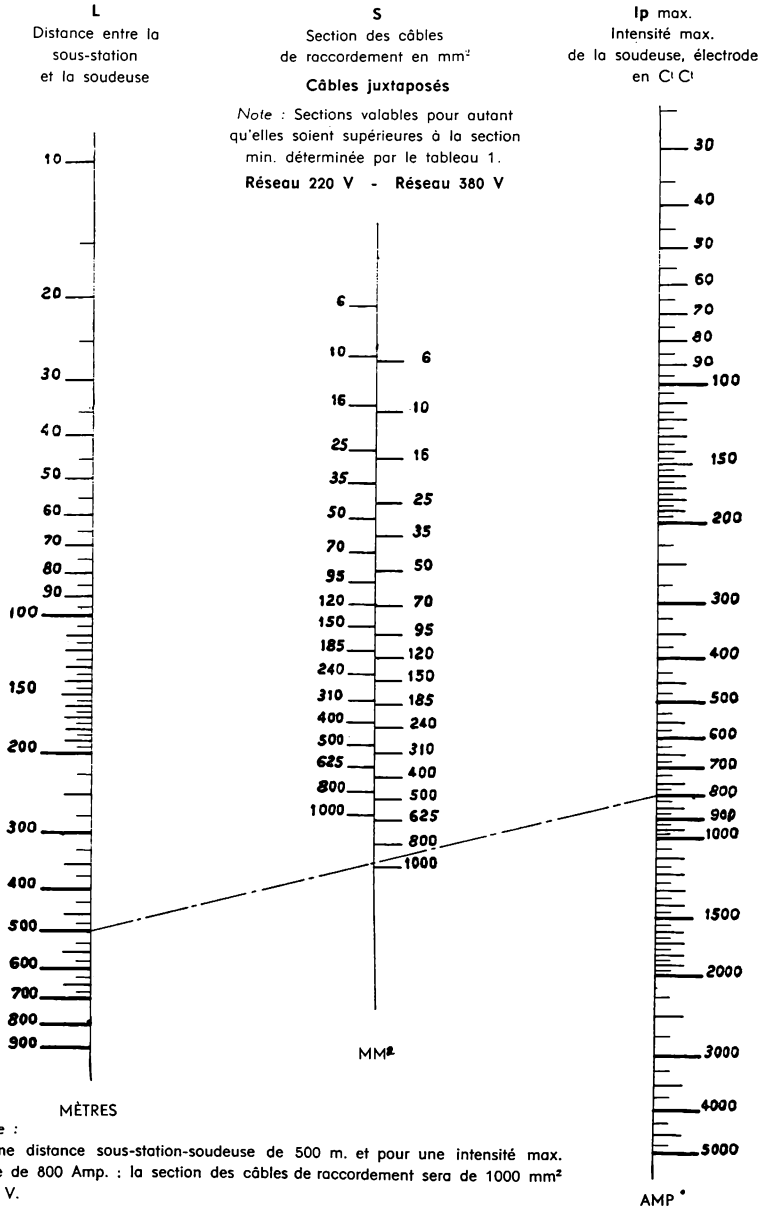
Cette vérification permettra de voir si la section minimum trouvée satisfait au second critère. Sinon, la section sera augmentée de façon à ne pas dépasser la chute limite de tension de 4 %.

On choisira la section standardisée se rapprochant le plus de la valeur obtenue. Un exemple d'application est donné aux abaques des pages 462 et 463.

Il est à conseiller, afin de ne pas obtenir des sections de câbles exagérées, de limiter autant que possible la distance entre la sous-station et la machine à souder.

SECTION DES CABLES DE RACCORDEMENT D'UNE SOUDEUSE PAR RÉSISTANCE DU TYPE MONOPHASÉ

En fonction de la longueur des câbles et de l'intensité max. primaire de ligne et pour une chute de tension dans les câbles limitée à 4 ‰ de la tens. ⁿ nominale

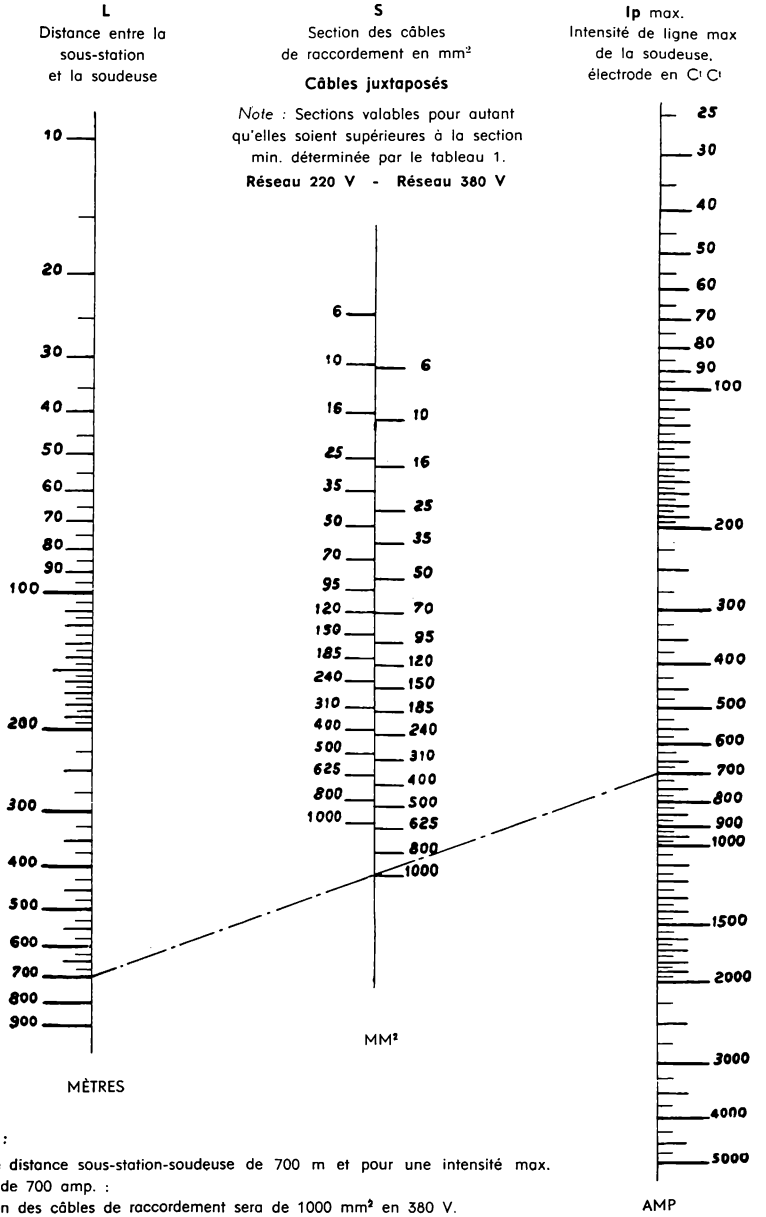


Exemple :

Pour une distance sous-station-soudeuse de 500 m. et pour une intensité max. primaire de 800 Amp. : la section des câbles de raccordement sera de 1000 mm² en 380 V.

SECTION DES CABLES DE RACCORDEMENT D'UNE SOUDEUSE PAR RÉSISTANCE DU TYPE TRIPHASÉ

En fonction de la longueur des câbles et de l'intensité max. primaire de ligne
et pour une chute de tension dans les câbles limitée à 4 °/o de la tens. n nominale



Exemple :

Pour une distance sous-station-soudeuse de 700 m et pour une intensité max. primaire de 700 amp. :
La section des câbles de raccordement sera de 1000 mm² en 380 V.

DÉTERMINATION DE LA VALEUR NOMINALE DES FUSIBLES DU CIRCUIT DE PUISSANCE

L'emploi des fusibles est obligatoire lorsque le circuit n'est pas protégé par un disjoncteur.

La fonction des fusibles dans un circuit électrique, consiste en une protection de ce dernier contre tous courants de court-circuit.

On déterminera la valeur nominale des fusibles suivant le type de machine, en prenant pour :

Machine à souder au galet ..... $I_{\text{nom. fus.}} = 1 \times I_{p\,100\,\%}$

Machine à souder au point .... }
Machine à souder en bout ..... } $I_{\text{nom. fus.}} = 2 \times I_{p\,100\,\%}$
Postes de brasage ..... }

Cette méthode de détermination tient compte des caractéristiques inhérentes à chaque type de machine, ainsi que des courbes de temporisation des fusibles.

Les valeurs nominales des fusibles étant standardisées par les constructeurs, il sera fait usage de la valeur nominale standardisée immédiatement supérieure à la valeur déterminée.

Dans le cas des exemples déjà cités plus haut, on aura :

Exemple I : fusibles de 400 A nominal;

Exemple III : fusibles de 400 A nominal.

DÉTERMINATION DE LA VALEUR NOMINALE DES SECTIONNEURS A PLACER DANS LE CIRCUIT DE PUISSANCE

Les sectionneurs n'étant pas destinés à couper en charge, leur intensité nominale sera égale à

$$I_{p\,100\,\%}.$$

Les valeurs nominales étant standardisées par les constructeurs, il sera fait usage de la valeur standardisée immédiatement supérieure à

$$I_{p\,100\,\%}.$$

Cette méthode de détermination assure le fonctionnement correct au point de vue échauffement de l'appareil. Quant à la chute de tension due aux contacts du sectionneur, elle est pratiquement négligeable, même pour un courant primaire maximum très élevé par rapport au courant primaire permanent.

Dans le cas des exemples déjà cités plus haut, on aura successivement :

Exemple I : sectionneur de 200 A nominal
Exemple II : sectionneur de 600 A nominal
Exemple III : sectionneur de 200 A nominal
Exemple IV : sectionneur de 300 A nominal
Exemple V : sectionneur de 300 A nominal.

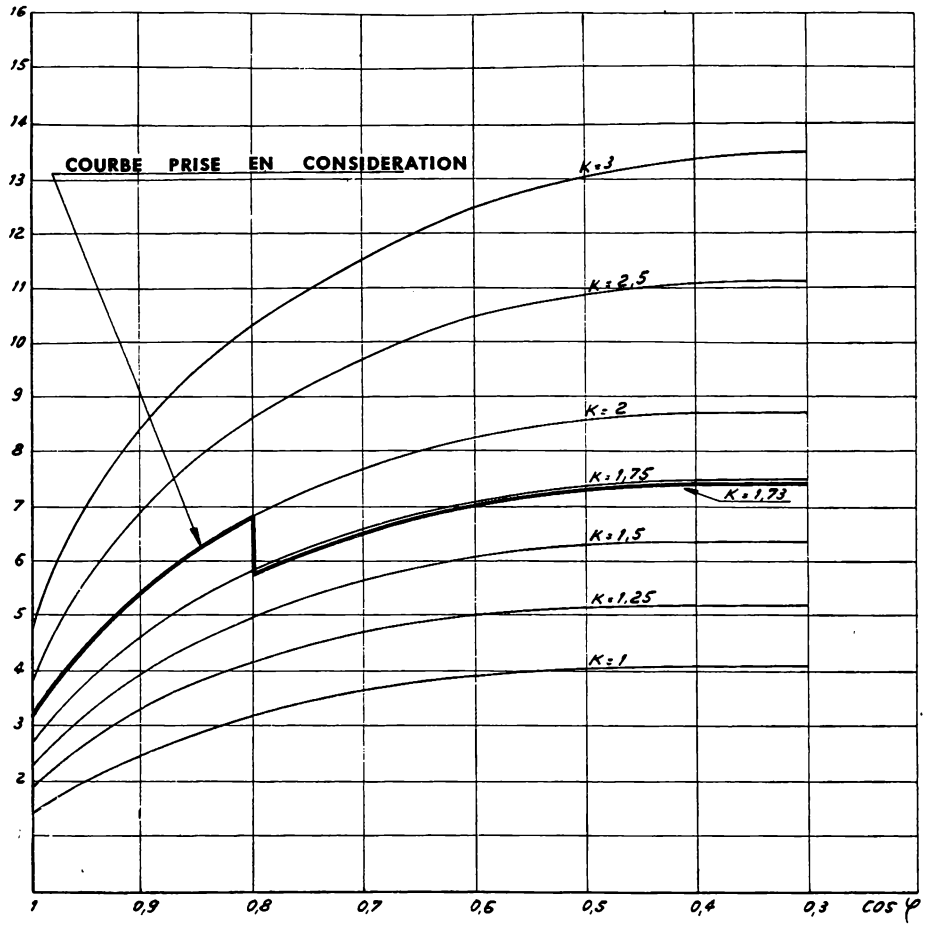


Fig. 426

Courbes moyennes pour transformateurs de toutes puissances : monophasés, tri-monophasés, triphasés (débitant en monophasé ou en triphasé).

Chute % $U_{nom.} = f$ (cos φ en soudage)

$$K = \frac{P_{débitée}}{P_{nominale}}.$$

DÉTERMINATION DE LA PUISSANCE NOMINALE DU TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION

A) ALIMENTATION D'UNE SEULE MACHINE

Le transformateur d'alimentation d'une machine à souder doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

— supporter l'échauffement produit par le passage du courant;

— limiter la chute de tension interne à une valeur acceptable.

Une des valeurs suivantes déterminera la puissance nominale minimum à prévoir pour le transformateur d'alimentation (elles satisfont au premier critère) :

$P_1 = P_{\text{tot. } 100\,\%}$ pour les machines à souder triphasées ainsi que pour les machines à souder monophasées alimentées par un transformateur monophasé.

$P_1 = P_{\text{tot. } 100\,\%} \times 3$ pour les machines à souder monophasées alimentées par un transformateur triphasé.

Ces valeurs seront vérifiées au moyen des règles ci-après qui découlent de l'étude du diagramme (fig. 426) et qui tendent à limiter, à une valeur admissible, les chutes de tension internes des transformateurs d'alimentation.

Cette vérification permettra de voir si la puissance nominale minimum satisfait au second critère. Sinon, on adoptera comme puissance nominale d'alimentation, la puissance P_2 déterminée par les règles suivantes :

Règle 1 :

Machine à souder triphasée (phases équilibrées).

Machine à souder monophasée alimentée par un transformateur monophasé.

Pour $\cos \varphi > 0{,}8$ $\qquad P_2 = \dfrac{P_{\text{tot. max.}}}{2}$ (1)

Pour $\cos \varphi < 0{,}8$ $\qquad P_2 = \dfrac{P_{\text{tot. max.}}}{1{,}73}$. (1')

Règle 2 :

Machine à souder monophasée alimentée par un transformateur triphasé (débitant sur deux phases seulement).

Pour $\cos \varphi > 0{,}8$ $\quad P_2 = \dfrac{P_{\text{tot. max.}}}{2} \times 3 = 1{,}5\ P_{\text{tot. max.}}$ (2)

Pour $\cos \varphi < 0{,}8$ $\quad P_2 = \dfrac{P_{\text{tot. max.}}}{1{,}73} \times 3 = \sqrt{3}\ P_{\text{tot. max.}}$ (2')

Pour les machines à souder en bout par étincelage on fera la vérification avec une valeur de puissance égale à 50 % de $P_{\text{tot. max.}}$ pour les mêmes raisons qu'exposé au paragraphe traitant de la détermination des sections des câbles de raccordement.

B) ALIMENTATION DE PLUSIEURS MACHINES A SOUDER

1. Machines à souder triphasées

Machines à souder monophasées alimentées par un transformateur monophasé.

La puissance nominale minimum sera égale à la somme de $P_{\text{tot. 100 \%}}$ des machines à souder.

Elle sera vérifiée suivant le cas, au moyen de la règle (1) ou (1′) appliquée à la machine à souder ayant la plus grande valeur pour $P_{\text{tot. max.}}$

2. Machines à souder monophasées alimentées par un transformateur triphasé

On aura soin d'équilibrer le plus possible les charges dans les phases.

Si la ligne la plus chargée alimente elle-même plusieurs machines à souder, la puissance nominale minimum sera égale à la somme des $P_{\text{tot. 100 \%}} \times 3$ de ces machines à souder.

Pour la vérification, on appliquera suivant le cas, les règles (2) ou (2′) à la machine à souder ayant la plus haute valeur pour $P_{\text{tot. max.}}$

3. Machines à souder triphasées et monophasées alimentées par le même transformateur

On équilibrera les phases le plus possible.

La puissance nominale minimum sera égale à la somme des $P_{\text{tot. 100 \%}}$ des machines à souder triphasées augmentée de la somme des $P_{\text{tot. 100 \%}} \times 3$ des machines à souder monophasées de la ligne la plus chargée.

La vérification se fera en deux fois :

— on appliquera la règle (1) ou (1′) suivant le cas à la machine à souder triphasée ayant la valeur la plus élevée pour $P_{\text{tot. max.}}$;

— on vérifiera ce résultat par l'application de la règle (2) ou (2′) à la machine à souder monophasée ayant la valeur la plus élevée pour $P_{\text{tot. max.}}$

Ces règles s'emploient pour la détermination de la puissance nominale d'alimentation de transformateurs de construction standard.

Dans le cas de réseaux alimentant uniquement les machines à souder, on peut admettre des chutes de tension internes plus élevées ($K > 2$, fig. 426), mais les transformateurs d'alimentation doivent alors pouvoir résister mécaniquement à ces surcharges, ce qui implique une construction hors série.

Dans le cas des exemples déjà cités plus haut, on aura successivement :

Exemple I :

1° Transformateur d'alimentation triphasé.

$$P_2 = 1{,}04 \times 187 \times \sqrt{3} = 337 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 1{,}04 \times 35 \times 3 = 106$ kVA

On choisira un transformateur de 350 kVA.

2° Transformateur d'alimentation monophasé.

$$P_2 = \frac{1{,}04 \times 187}{1{,}73} = 112 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 1{,}04 \times 35 = 36$ kVA.

On choisira un transformateur de 150 kVA.

Exemple II :

1° Transformateur d'alimentation triphasé.

$$P_2 = 1{,}04 \times 246 \times \sqrt{3} = 438 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 1{,}04 \times 132 \times 3 = 404$ kVA.

On choisira un transformateur de 450 kVA.

2° Transformateur d'alimentation monophasé.

$$P_2 = \frac{1{,}04 \times 246}{1{,}73} = 148 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 132 \times 1{,}04 = 137$ kVA.

On choisira un transformateur de 150 kVA.

Exemple III :

1° Transformateur d'alimentation triphasé.

$$P_2 = \frac{1{,}04 \times 194 \times 0{,}5}{2} \times \sqrt{3} = 151 \text{ kVA.}$$

soit $< P_1 = 1{,}04 \times 61 \times 3 = 190$ kVA.

On choisira un transformateur de 200 kVA.

2° Transformateur d'alimentation monophasé.

$$P_2 = \frac{1{,}04 \times 194 \times 0{,}5}{2} = 51 \text{ kVA}$$

soit $< P_1 = 1{,}04 \times 61 = 64$ kVA.

On choisira un transformateur de 75 kVA.

Exemple IV :

Transformateur d'alimentation triphasé.

$$P_2 = \frac{1{,}04 \times 305}{2} = 158 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 1{,}04 \times 84 = 87$ kVA.

On choisira un transformateur de 150 kVA.

Exemple V :

1° Transformateur d'alimentation triphasé.

$$P_2 = 1{,}04 \times 572 \times \sqrt{3} = 1\,030 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 1{,}04 \times 66 \times 3 = 204$ kVA.

On choisira un transformateur de 1 000 kVA.

2° Transformateur d'alimentation monophasé.

$$P_2 = \frac{1{,}04 \times 572}{1{,}73} = 355 \text{ kVA}$$

soit $> P_1 = 1{,}04 \times 66 = 69$ kVA.

On choisira un transformateur monophasé de 350 kVA.

LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN SOUDAGE

Si l'on calcule la quantité d'énergie nécessaire pour fondre la partie qui sera commune aux deux pièces après soudure et que l'on fait ensuite le rapport entre cette quantité et la quantité réellement mise en jeu, on constate que le rendement thermique total est faible et de l'ordre de quelques pour cents.

Ceci ne veut toutefois pas dire que les procédés de soudage par résistance ne soient pas rentables. Car, en dehors des avantages nombreux que ces procédés présentent en tant que moyen d'assemblage, il faut connaître la consommation en valeur absolue ou du moins l'ordre de grandeur.

Disons immédiatement que cette consommation est faible, ce qui est un argument supplémentaire en faveur du soudage par résistance.

Nous reprenons ci-après les 3 procédés classiques et déterminons l'ordre de grandeur de la consommation en énergie, pour soudage d'acier doux.

Pour faciliter les calculs, nous ne considérons que le circuit secondaire en considérant que le rendement du transformateur est égal à 1.

SOUDAGE PAR POINT

$$W = R . I^2 . t .$$

Supposons un circuit de soudage moyen ayant une résistance ohmique de 300 microhms.

$$R = 0{,}0003\ \Omega.$$

Nous savons que pour un temps de soudage de 1 période on peut poser

$$I = K \times S$$

$$K = 1\,000 \text{ pour l'acier}$$

$$I = \frac{1\,000 \times \pi \times d^2}{4}$$

d = diamètre du point en mm.

$$W = 0{,}0003 \times \left(\frac{1\,000 \times \pi \times d^2}{4}\right)^2 \times \frac{1}{50 \times 3\,600} \times \frac{1}{1\,000} \text{ kWh/point}$$

$$= \pm \frac{d^4}{1\,000\,000} \text{ kWh/point}$$

$$= \frac{d^4}{1\,000} \text{ kWh/1 000 points.}$$

Prenant pour exemple un point de ⌀ 5 mm (tôle de 1 mm) on obtient :

$$W = \frac{625}{1\,000} = \pm 0{,}625 \text{ kWh/1 000 points.}$$

Sachant que la production journalière d'une machine à souder par point peut atteindre 5 ou 10 000 points, on a une idée de la consommation électrique par jour.

Remarquons que l'on obtient qu'un ordre de grandeur, puisque les calculs sont basés sur un circuit moyen.

De toute façon on peut en conclure que la consommation électrique en soudage par point est négligeable dans l'établissement d'un prix de revient.

SOUDAGE AU GALET

Supposons le même circuit de soudage d'une résistance ohmique de 0,0003 ohm.

Nous choisissons de souder à la vitesse idéale (voir paramètre de soudage au galet).

Or nous savons que pour l'acier :

$$I \text{ idéal} = 2 \times 7\,500 \times \sqrt{e + 1}$$

$$= 15\,000 \sqrt{e + 1}$$

et que

$$V \text{ idéal} = \frac{7\,500 \sqrt{e + 1}}{1\,600 \times e \times \sqrt{e + 1}} = \frac{4{,}7}{e}.$$

La consommation horaire, tenant compte que $t_s = t_r$, d'où $k = 0{,}5$, se calcule :

$$W = k\, R\, .\, I^2 .\, t$$

$$= 0{,}5 \times 0{,}0003 \times (15\,000 \sqrt{e + 1})^2 \times \frac{1}{1\,000} \text{ kWh}$$

$$= 33{,}8\ (e + 1) \text{ kWh.}$$

Pendant 1 heure, la longueur soudée sera de :

$$V \text{ idéal} \times 60 = \frac{4{,}7}{e} \times 60 = \frac{282}{e}.$$

La consommation par mètre courant de soudure étanche s'écrit :

$$W/\text{mètre} = \frac{33{,}8\ (e + 1)}{\frac{282}{e}} = 0{,}12\ e\ (e + 1) \text{ kWh/mètre.}$$

Prenant comme exemple des tôles de 1,25 mm, la consommation sera de l'ordre de :

$$0{,}12 \times 1{,}25\ (1 + 1{,}25) = 0{,}42 \text{ kWh/mètre.}$$

Il s'agit ici encore d'un ordre de grandeur puisque nous avons supposé un circuit de soudage de 0,0003 ohm de résistance ohmique et le soudage à la vitesse donnant le meilleur rendement thermique.

SOUDAGE EN BOUT

Soit la section à rabouter représentée par S.

On peut dire que la chaleur théoriquement requise pour fondre les pièces sur une certaine longueur est proportionnelle à S puisque le volume fondu

$$V = S \times d$$

d étant la course d'étincelage.

Si l'on néglige les pertes par rayonnement et les pertes dues à la résistance ohmique du circuit de soudage, qui est très faible par rapport à celle des pièces, et que l'on ne considère que les pertes par conduction dans les pièces vers les mâchoires, on peut écrire également qu'elles sont fonction de S, la section de passage.

D'une façon générale on peut donc formuler que l'énergie requise par soudure s'exprime par

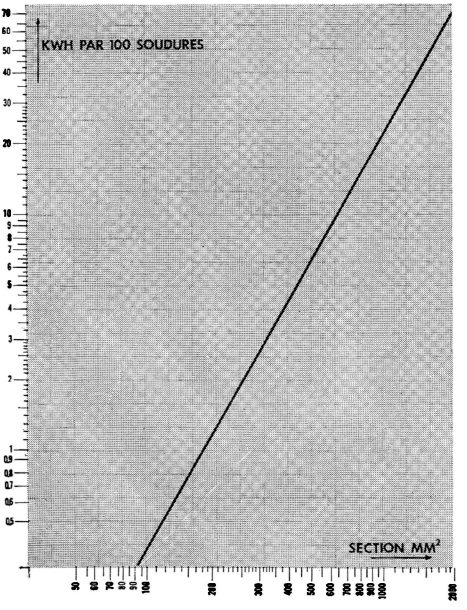
$$W = K . S^a$$

K et a étant inconnus.

Une telle équation mène à l'expression

$$\log W = \log K + a \log S$$

Les résultats expérimentaux pour soudage d'acier, relevés sur diagramme à échelle logarithmique, conduisent à une courbe confirmant l'expression ci-dessus, ainsi que l'on peut le constater par le diagramme ci-dessous.



CHAPITRE X *

CALCUL DES CIRCUITS DE SOUDAGE

CRITÈRES DE DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, le résultat de l'opération de soudage par résistance dépend des paramètres électriques suivants : l'intensité du courant I_2, la résistance électrique des corps soudés R_s, et le temps de passage du courant t. Il résulte de la combinaison de ces grandeurs, d'après la loi de Joule, que la quantité de chaleur apportée à la soudure est :

$$\frac{Q}{\eta} = k \int_0^T R_s \, I_2^2 \, \mathrm{d}t .$$

D'autre part, pour un problème de soudage donné, il existe une intensité de courant optimum, correspondant aux conditions d'opération les plus favorables.

Le calcul des circuits électriques permet de vérifier la possibilité d'atteindre cette intensité, ou éventuellement de fixer les caractéristiques du transformateur dont une machine doit être équipée. Il permet également la vérification de la capacité thermique des conducteurs et du transformateur en fonction des cadences de soudage (facteur de marche) prévues.

Dans cet exposé ayant un but essentiellement pratique, nous établissons les calculs, à partir des formules, sans entrer dans les détails de la théorie, sauf où cela est nécessaire pour la compréhension.

* Ce chapitre a été rédigé par J. Vieweger, Ingénieur AILg et AIM, Chef du Service « Recherches » à la S.A. Electromécanique, Bruxelles.

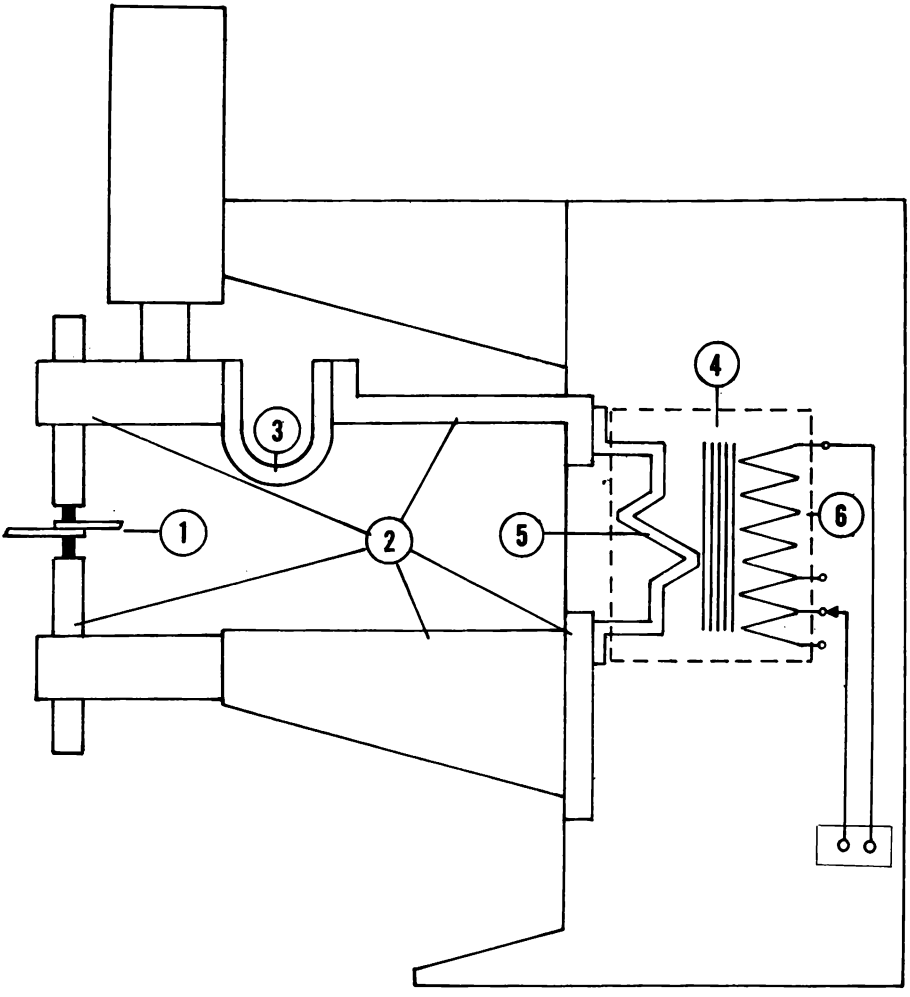


Fig. 427
Schéma du circuit électrique d'une machine à souder.

1. Pièces soudées
2. Pièces conductrices secondaires
3. Flexible conducteur
4. Transformateur
5. Spires secondaires
6. Enroulement primaire

CIRCUIT ÉLECTRIQUE D'UNE MACHINE A SOUDER

Tous les calculs et coefficients sont établis pour une fréquence du réseau de 50 Hz. Nous examinerons ultérieurement les modifications à y apporter pour des fréquences s'écartant de cette valeur.

La figure 427 montre le circuit électrique d'une machine à souder par points monophasée. Dans d'autres types de machines à souder ce circuit se présentera sous une forme différente, mais on y retrouvera les mêmes éléments, c'est-à-dire :

A) Le circuit secondaire extérieur, constitué :
   1. des éléments conducteurs rigides, ou flexibles,
   2. des électrodes,
   3. des pièces à souder.

B) Le transformateur, comportant l'enroulement primaire et les spires secondaires.

Ces divers éléments sont connectés électriquement par contacts sous pression. La pression est appliquée au moyen soit de vis, soit de dispositifs de serrage à levier, soit de cylindres pneumatiques, etc.

Considérons d'abord le circuit électrique extérieur. Chacun des éléments possède sa résistance électrique propre (R). Il en est de même pour les contacts qui les relient. Toutes ces résistances étant mises en série, la résistance totale du circuit extérieur sera égale à leur somme :

$$R_e = \Sigma R.$$

Cette résistance s'oppose au passage du courant dans le circuit secondaire, en créant une chute de tension :

$$I_2 . R_e$$

En dehors de la résistance, il y a un second facteur qui s'oppose au passage du courant dans le circuit secondaire : la réactance (X_e).

En effet, le circuit secondaire forme une boucle et cette réactance résulte du flux magnétique (Φ_e), (engendré par le courant I_2) entourant les conducteurs et traversant la boucle. On a :

$$X_e = 2 \pi f \frac{\Phi_e}{I_2} \times 10^{-3} \text{ ohm}$$

f étant la fréquence du réseau = 50 Hz.

Le courant I_2 circulant dans le circuit étant alternatif, le flux l'est également et fait naître une force contre-électromotrice :

$$I_2 \cdot X_e$$

Cette force contre-électromotrice s'ajoute vectoriellement à la chute de tension ohmique. La résultante (fig. 428) est la tension aux bornes du circuit (U_e).

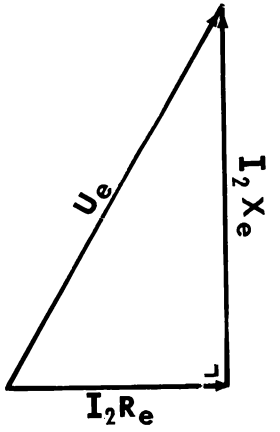


Fig. 428

Diagramme des chutes de tension dans le circuit extérieur d'une machine à souder :

U_e : tension aux bornes du circuit
I_2R_e : chute de tension ohmique
I_2X_e : chute de tension inductive

On a numériquement :

$$U_e = \sqrt{(I_2 X_e)^2 + (I_2 R_e)^2} = I_2 \sqrt{X^2_e + R^2_e}.$$

Le rapport

$$Z_e = \frac{U_e}{I_2} = \sqrt{X^2_e + R^2_e}$$

est appelé « impédance du circuit extérieur ».

En considérant le transformateur, nous retrouvons les mêmes facteurs, la résistance de ses enroulements (R_t) et leur réactance (X_t), qui s'opposent au passage du courant par la création de chutes de tension.

Pour la simplification des calculs, nous ramenons toutes les grandeurs concernant le transformateur au secondaire, ce qui équivaut à considérer le transformateur comme ayant le même nombre de spires primaires et secondaires (n_2).

Dans un tel transformateur, les forces électromotrices induites à vide dans les roulements primaire et secondaire sont égales. Il en est de même (si on néglige le courant magnétisant) pour les courants traversant les enroulements. On peut donc considérer, au point de vue impédance et chutes de tension, les deux enroulements comme mis en série.

Pour passer d'un transformateur donné à ce transformateur équivalent, on doit utiliser les formules suivantes :

— pour les tensions : $U_{12} = U_1 \frac{n_2}{n_1} = U_2$;

— pour les courants : $I_{12} = I_1 \frac{n_1}{n_2} = I_2$;

— pour les résistances : $R_{12} = R_1 \frac{n^2_2}{n^2_1}$;

— pour les réactances : $X_{12} = X_1 \frac{n^2_2}{n^2_1}$.

Les indices (1) correspondent aux valeurs primaires du transformateur donné.
Les indices (12) correspondent aux mêmes valeurs, mais ramenées au secondaire.
Les indices (2) correspondent aux valeurs secondaires.

Si l'on sait dissocier la résistance primaire et secondaire, il est plus difficile de le faire pour les réactances, qui elles proviennent d'un flux de fuite commun, passant entre le primaire et le secondaire. Pour cette raison nous ne considérons que la réactance totale des enroulements, ramenée au secondaire (X_t).

Le schéma équivalent du circuit électrique d'une machine à souder est représenté à la figure 429.

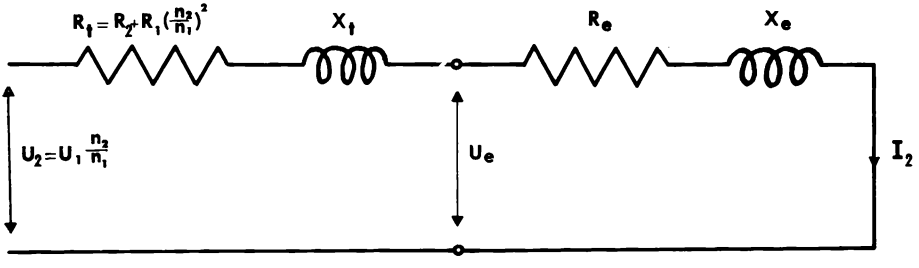


Fig. 429

Schéma équivalent du circuit électrique d'une machine à souder.

U_2 — tension secondaire du transformateur à vide,
U_e — tension aux bornes du circuit extérieur,
I_2 — courant secondaire,
R_t — résistance équivalente du transformateur,
X_t — réactance équivalente du transformateur,
R_e — résistance du circuit extérieur,
X_e — réactance du circuit extérieur.

Nous avons négligé l'influence du courant magnétisant sur les chutes de tension dans le transformateur.

A ce schéma équivalent correspond le diagramme vectoriel des chutes de tension, représenté à la figure 430.

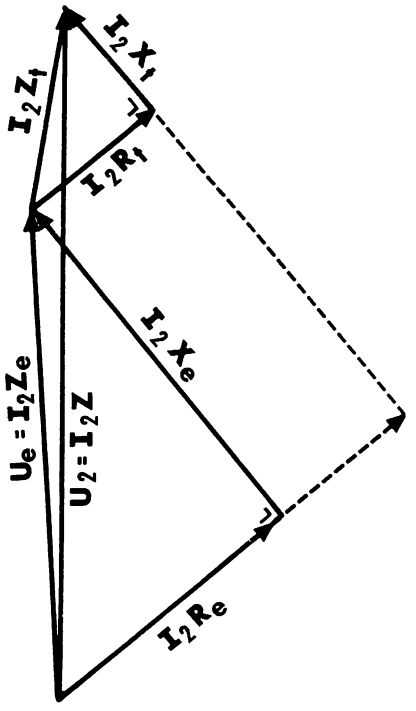


Fig. 430
Diagramme des chutes de tension dans une machine à souder.

Nous déduisons de ce diagramme les relations numériques suivantes :

— Impédance totale du circuit électrique (ramenée au secondaire) :

$$Z = \sqrt{(X_e + X_t)^2 + (R_e + R_t)^2}$$

— Tension secondaire à vide du transformateur :

$$U_2 = I_2 \, . \, Z$$

DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE DU CIRCUIT EXTÉRIEUR

Cette résistance est égale, comme nous l'avons déjà vu, à la somme des résistances partielles suivantes :

— Résistance propre des conducteurs constituant le circuit de la machine (R_c).

— Résistance des contacts entre les divers éléments (R_p).

— Résistance des pièces soudées (R_s).

De toutes ces résistances seules celles des conducteurs peuvent être déterminées par le calcul avec une certaine précision. La résistance des pièces soudées, comme d'ailleurs celle des contacts est essentiellement variable, ainsi que nous l'avons vu dans le chapitre traitant du soudage par points. Dans la plupart des cas on se contente d'une estimation très grossière de ces résistances, ceci étant admissible du fait que l'impédance totale du circuit est généralement très supérieure, et que les erreurs commises dans cette évaluation ont une faible répercussion sur le résultat final.

La résistance propre des conducteurs sera donnée par la somme des résistances de tous les éléments :

$$R_c = \Sigma R_i$$

La résistance d'un élément (R_i), de section constante (S_i) cm² et de longueur (l_i) cm, exécuté d'une matière ayant une résistivité de (ρ_i) $\mu\Omega$ cm, se calcule d'après la formule :

$$R_i = \frac{\rho_i \, l_i}{S_i} \, \mu\Omega.$$

On peut admettre pour (ρ) les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous :

Matière	Résistivité ρ $\mu\Omega$ cm
Cuivre laminé	2
Cuivre coulé, cuivre au chrome	2,5
Aluminium conductible (Al. Mg. Si)	4
Bronze conductible (95 % Cu)	5
Duralumin, Alpax, AlMg3 laminé	6
AlMg3 coulé	7
Laiton laminé	10
Bronze étanche, bronze d'aluminium, laiton coulé, acier doux	15
Bronze mécanique	20
Acier inoxydable 18/8	80

Il s'agit bien entendu de valeurs d'orientation, pouvant varier suivant la composition de l'alliage et sa température d'utilisation. Elles correspondent à une température moyenne d'environ 50 °C.

Pour la résistance des contacts entre les éléments du circuit extérieur, à l'exclusion des contacts avec les pièces soudées, on adopte dans les calculs courants une valeur fixe par contact (r) en $\mu\Omega$, généralement 2 $\mu\Omega$ et on multiplie par le nombre des contacts mis en série (p).

Les résistances ainsi calculées correspondent à celles mesurées lors du passage de courant continu. Le passage du courant alternatif donne lieu à des pertes supplémentaires, dues à l'effet Kelvin (l'expulsion des lignes du courant, par leur champ magnétique vers la périphérie d'un conducteur massif), aux courants de Foucault dans les conducteurs et les masses métalliques voisines et à la présence des masses magnétiques dans le champ du circuit, ou prennent en plus naissance des pertes hystérétiques. Toutes ces pertes se traduisent par une augmentation apparente de la résistance. On en tient compte, en multipliant les résultats obtenus d'après les formules précédentes par un coefficient (β_e), compris généralement entre 1,15 et 1,5.

La résistance des pièces soudées pourra être évaluée sur la base des considérations exprimées dans le chapitre III. On calcule la résistance propre des pièces soudées, à chaud, en négligeant les résistances de contact, entre les pièces et entre les pièces et les électrodes. La résistance des pièces à chaud sera estimée à partir de la résistance à froid (R_f) en $\mu\Omega$, en la multipliant par un coefficient (τ) correspondant à l'augmentation de la résistance due à l'élévation de la température des pièces. Pour l'acier doux on aura $\tau = 5$, ce qui donnera par exemple pour le soudage par points, de 2 tôles de 1 mm, une résistance à chaud de : $(2 \,.\, 7) \,.\, 5 = 70$ $\mu\Omega$.

En résumé, nous obtenons pour le calcul de la résistance du circuit extérieur, la formule globale suivante :

$$R_e = R_c + R_p + R_s = \beta_e \,.\, \left(\Sigma \frac{\rho_i \, l_i}{S_i} + \rho \,.\, r \right) + \tau \,.\, R_f \; \mu\Omega.$$

DÉTERMINATION DE LA RÉACTANCE DU CIRCUIT EXTÉRIEUR

Comme il a été vu au paragraphe « Circuit électrique d'une machine à souder », le circuit extérieur d'une machine à souder forme une boucle, dont les extrémités sont raccordées au transformateur. La réactance de cette boucle est égale à :

$$X_e = 2 \pi f \frac{\Phi e}{I_2} . 10^{-2} \mu\Omega.$$

Le rapport $L_e = \frac{\Phi e}{I_2}$, appelé coefficient de self-induction de la boucle, ne dépend que des formes géométriques et des propriétés magnétiques des conducteurs et du milieu.

Dans la plupart des machines à souder par point et au galet, on peut négliger la présence des masses magnétiques, suffisamment éloignées des conducteurs, et calculer ce coefficient comme pour une boucle placée dans l'air. Dans certaines machines, surtout les machines à souder en bout, les masses magnétiques sont trop rapprochées des conducteurs et l'on doit apporter des corrections. Nous citerons deux méthodes :

1° On majore le coefficient de self-induction trouvé par le calcul en le multipliant par un coefficient déduit expérimentalement de mesures réalisées sur des machines de construction analogue.

2° On trace (fig. 431) des trajets approximatifs des lignes de force en tenant compte des masses magnétiques (on néglige la réluctance de ces masses). On estime le rapport moyen de la diminution de longueur de ces trajets et on multiplie par l'inverse de ce rapport le coefficient de self-induction calculé pour un circuit placé dans l'air (on adopte une moyenne pour toute la longueur du circuit).

On trouve dans la littérature spécialisée des formules permettant de calculer le coefficient de self-induction des boucles formées par des conducteurs affectant des formes géométriques simples. L'emploi de ces formules conduit toutefois à des calculs assez longs et de ce fait fastidieux. Pour cette raison on préfère présenter ces calculs sous forme d'abaque, se rapportant à un cas simple, et ramener chaque fois le circuit considéré à un circuit équivalent.

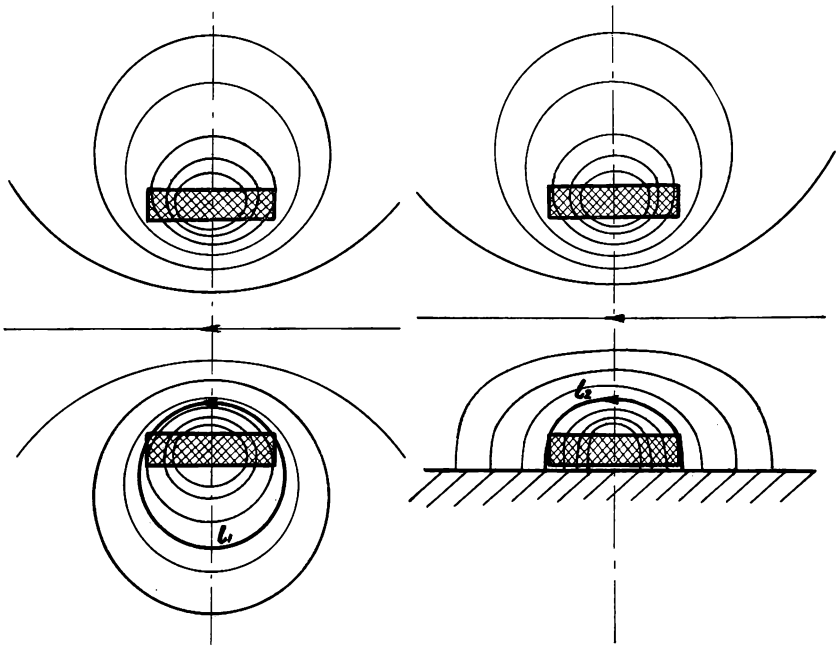


Fig. 431

Influence des masses magnétiques sur la répartition des lignes des forces.

l_1 — ligne de force moyenne dans l'air,

l_2 — ligne de force moyenne en présence d'une masse magnétique.

Rapport de la self-induction des barres inférieures :

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{l_1}{l_2}$$

L'abaque (fig. 432) permet de calculer directement la réactance $X_e = 2\,\pi\,f\,.\,L_e$, à $f = 50$ Hz, d'une boucle rectangulaire, formée par un conducteur de section ronde. On y trouve le coefficient (ε), par lequel il faut multiplier le grand côté du rectangle (a), mesuré en cm, pour trouver la réactance de la boucle en $\mu\Omega$.

Le coefficient (ε) est donné en fonction du rapport des côtés $\left(\frac{a}{b}\right)$ et du grand côté au rayon du conducteur $\left(\frac{a}{c}\right)$.

$$X_e = \varepsilon\,.\,a \qquad \varepsilon = f\left(\frac{a}{b}\,;\,\frac{a}{c}\right).$$

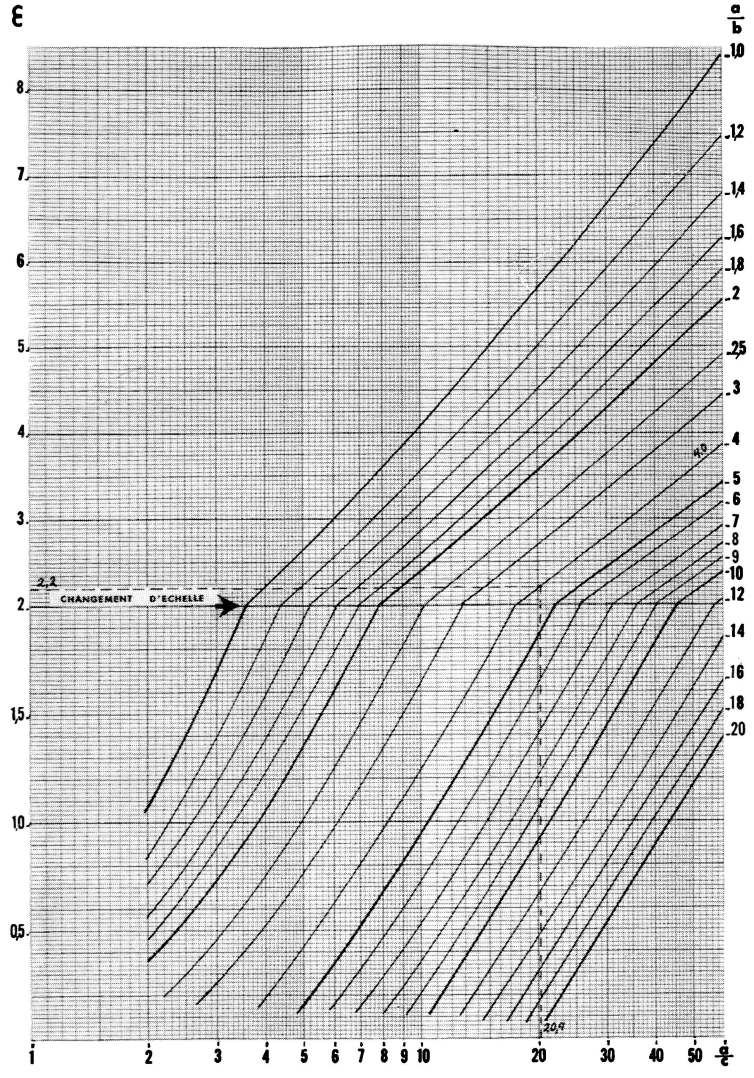


Fig. 432

Abaque pour le calcul de la réactance d'une spire rectangulaire formée par un conducteur rond

a — grand côté du rectangle en cm

b — petit côté du rectangle en cm,

c — rayon du conducteur en cm,

Réactance à 50 Hz $= \varepsilon \, . \, a$ en $\mu\Omega$.

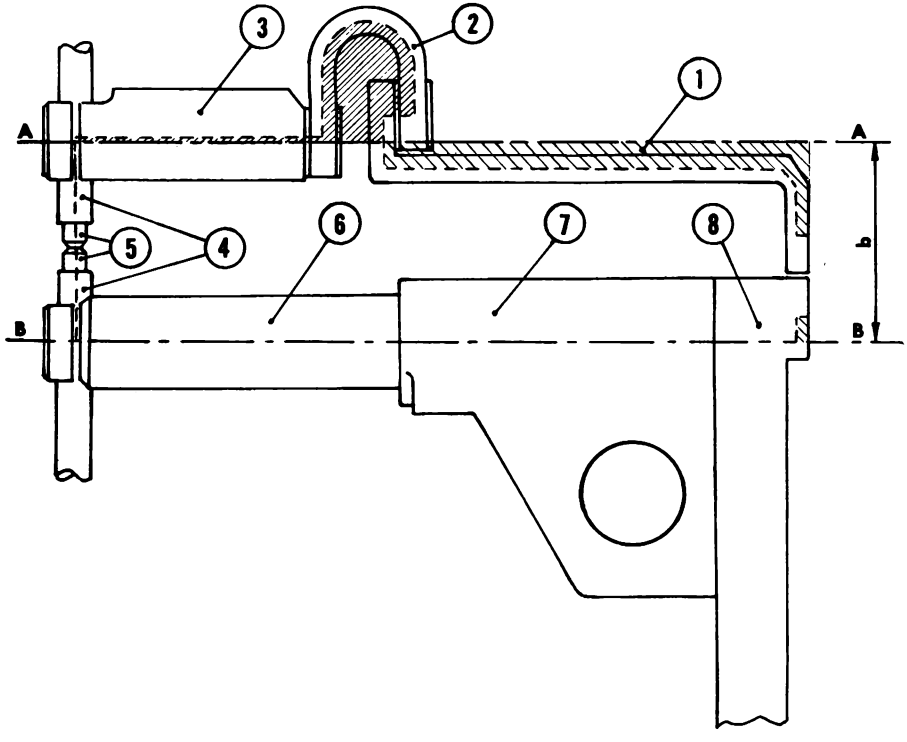


Fig. 433

Calcul de la résistance et de la réactance du circuit extérieur d'une soudeuse par points. Décomposition du circuit et détermination de la spire rectangulaire équivalente.

On ramène un circuit quelconque à un circuit rectangulaire équivalent de façon suivante (fig. 433) :

On trace d'abord les 2 axes moyens A-A et B-B correspondants aux grands côtés du rectangle, de façon à ce que la somme des surfaces comprises entre l'axe moyen et l'axe du circuit (surfaces hachurées) soit égale de part et d'autre de l'axe moyen. La distance entre les axes moyens en cm correspondra au côté (b) du rectangle.

On trouve le périmètre du rectangle (L), en additionnant les longueurs des différents éléments (l_i). Le grand côté du rectangle sera trouvé de la relation :

$$a = \frac{L}{2} - b.$$

Puis on calcule le rayon moyen du conducteur, en partant de sa section moyenne :

$$\frac{v}{L}, \qquad \text{où } v = \Sigma\, l_i\, S_i = \text{volume des conducteurs.}$$

$$c = 0{,}564 \sqrt{\frac{v}{L}} = \text{rayon du conducteur.}$$

En possession de ces valeurs, on détermine les rapports :

$\frac{a}{b}$ et $\frac{a}{c}$ et on trouve sur l'abaque la valeur (ε) correspondante.

Cette façon de procéder convient généralement bien pour le calcul des soudeuses dont les circuits se rapprochent plus ou moins de la forme rectangulaire, par exemple soudeuses au point et au galet.

Dans les machines où les circuits sont plus compliqués, il est utile parfois de les décomposer en plusieurs parties et de traiter chacune comme une boucle rectangulaire séparée, puis additionner les résultats. Ce procédé ne peut toutefois pas être appliqué, si les différentes parties du circuit sont couplées par des parties communes du flux magnétique, car dans ce cas les résultats doivent être majorés, ou diminués (suivant la disposition géométrique), pour tenir compte de l'induction mutuelle, résultant du couplage.

Repère	Dénomination	Matière	Résistivité ρ_i	Section S_i	Longueur l_i	Volume $l_i S_i$	Résistance $\frac{\rho_i l_i}{S_i}$
			$\mu\Omega$ cm	cm²	cm	cm³	$\mu\Omega$
1	Conduct. supér. .	Cu coulé	2,5	25	50	1 250	5,0
2	Flexible	Cu laminé	2,0	25	28	700	2,2
3	Bras supérieur ...	Cu laminé	2,0	70	22	1 540	0,6
4	Porte-électrodes..	Mallory 3	2,5	6,2	14	87	5,6
5	Electrodes	Mallory 3	2,5	2	5	10	6,2
6	Bras extensible ..	Cu laminé	2,0	57	30	1 710	1,0
7	Porte-bras	Bronze cond.	5,0	60	30	1 800	2,5
8	Tablier	Laiton coulé	15,0	120	9	1 080	1,1
					Sommes :	$L = 188$	$v = 7\,977$	24,2

Résistance des contacts : $p \cdot r = 10 \times 2$ 20

Somme des résistances en courant continu $\Sigma \frac{\rho_i l_i}{S_i} + p \cdot r$ 44,2

Résistance en courant alternatif : $R_c + R_p$; $\beta_e = 1,3$ 57,5

Résistance des pièces soudées : R_s 90

Résistance totale du circuit extérieur : $R_c + R_p + R_s = R_e$ 147,5

Rayon moyen des conducteurs : $0,564 \sqrt{\frac{v}{L}} = c = 3,7$ cm

Hauteur du rectangle équivalent : $b = 18,8$ cm

Base du rectangle : $\frac{L}{2} - b = a = 75,2$ cm

Rapports : $\frac{a}{b} = 4,0$; $\frac{a}{c} = 20,4$;

D'après l'abaque : $\varepsilon = 2,2$ $\mu\Omega$/cm

Réactance du circuit extér. à 50 Hz, en $\mu\Omega$: $\varepsilon \cdot a = X_e =$ 165

Impédance du circuit à 50 Hz en $\mu\Omega$: $\sqrt{R^2_e + X^2_e} = Z_e =$ 222

EXEMPLE DE CALCUL D'IMPÉDANCE DU CIRCUIT EXTÉRIEUR SUR MACHINE A SOUDER PAR POINTS

Calculons l'impédance du circuit extérieur d'une soudeuse par points, soudant 2 tôles en acier doux de 2 mm d'épaisseur, représenté sur la figure 433.

Pour ordonner nos calculs, nous les réunissons dans le tableau de la page 488.

Les résistivités des conducteurs sont reprises du tableau de la page 481. Les sections et les longueurs des pièces, sont relevées sur plan en cm (ces dernières, en suivant l'axe moyen de passage du courant, indiqué en pointillé).

Nous avons adopté pour la résistance des contacts une valeur de 2 $\mu\Omega$ par contact et nous en avons dénombré 10 ce qui nous donne une résistance des contacts de $2 \times 10 = 20$ $\mu\Omega$.

Le circuit étant d'une section moyenne et éloigné des masses magnétiques nous avons adopté pour le coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif une valeur de 1,3. La résistance en courant continu étant de 44,2 $\mu\Omega$, celle en alternatif sera de :

$$1{,}3 \times 44{,}2 = 57{,}5 \ \mu\Omega.$$

La résistance des pièces soudées est calculée de façon suivante :

Diamètre du point soudé :

$$d = 2e + 2{,}5 \text{ mm} = 2 \times 2 + 2{,}5 = 6{,}5 \text{ mm} = 0{,}65 \text{ cm}$$

Section du point soudé :

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \times 0{,}65^2}{4} = 0{,}33 \text{ cm}^2.$$

La hauteur du cylindre conduisant le courant : $2 \cdot e = 2 \times 0{,}2 = 0{,}4$ cm.

La résistance à froid de ce cylindre : (résistivité de l'acier 15 $\mu\Omega$ cm).

$$R_f = \frac{\rho l}{S} = \frac{15 \times 0{,}4}{0{,}33} = 18 \ \mu\Omega.$$

La résistance à chaud : ($\tau = 5$).

$$R_s = \tau \cdot R_f = 5 \times 18 = 90 \ \mu\Omega.$$

Le rayon moyen des conducteurs :

$$c = 0{,}564 \sqrt{\frac{7\,977}{188}} = 3{,}7 \text{ cm}.$$

Base du rectangle : $a = \dfrac{188}{2} = 18{,}8 — 75{,}2$ cm.

$$\frac{a}{b} = \frac{75{,}2}{18{,}8} = 4; \ \frac{a}{c} = \frac{75{,}2}{3{,}7} = 20{,}4.$$

Nous trouvons sur l'abaque (fig. 432), à l'intersection de l'abscisse $\frac{a}{c} = 20{,}4$ et de la courbe $\frac{a}{b} = 4$, l'ordonnée $\varepsilon = 2{,}2$ (valeurs repérées en pointillé).

Réactance $X_e = 2{,}2 \times 75{,}2 = 165\ \mu\Omega$.

Impédance : $Z_e = \sqrt{147{,}5^2 + 165^2} = 222\ \mu\Omega$.

A titre d'information on notera que des mesures effectuées sur cette machine, sans présence des tôles soudées, ont fourni les valeurs suivantes :

$$X_e = 155\ \mu\Omega;\ R_c + R_p = 54\ \mu\Omega.$$

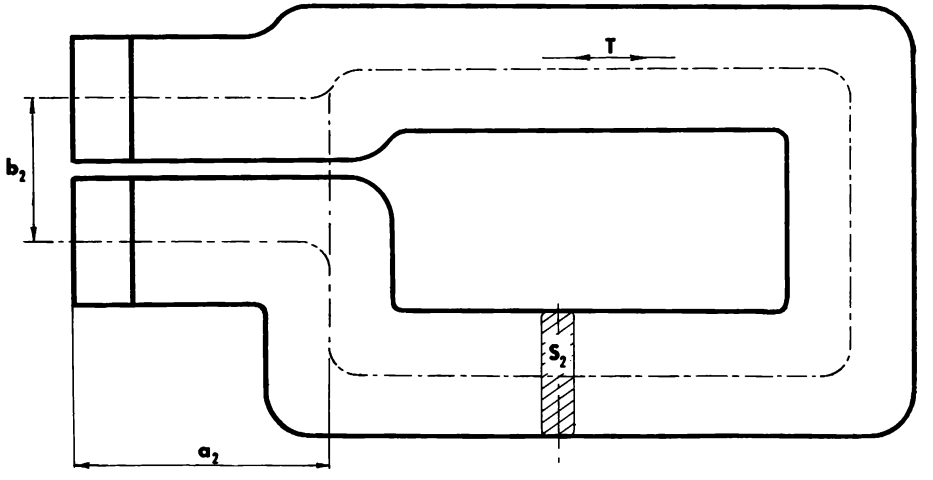


Fig. 434
Spire secondaire d'un transformateur.

CALCUL DE LA RÉSISTANCE ET DE LA RÉACTANCE DU TRANSFORMATEUR

La résistance totale du secondaire sera calculée d'après la formule :

$$R_2 = \frac{\beta_2 \cdot n^2_2 \cdot \rho_2 (T + 2\, a_2 - b_2)}{m_2 \cdot S_2} \text{ en } \mu\Omega$$

et la résistance primaire :

$$R_1 = \frac{\beta_1 \cdot n_1 \cdot \rho_1 \cdot T}{S_1} \text{ en } \mu\Omega$$

où β_1, β_2 — Coefficients de majoration des pertes en courant alternatif, respectivement dans le primaire et dans le secondaire.

ρ_1, ρ_2 — Résistivités respectives du primaire et du secondaire en $\mu\Omega$ cm.

T, a_2, b_2 — Dimensions d'après la figure 434, en cm.

m_2 — Nombre total de plaques secondaires.

S_2 — Section d'une plaque secondaire en cm².

S_1 — Section totale de tous les conducteurs primaires connectés en parallèle, en cm².

Les coefficients β_1 et β_2 dépendent des dimensions des conducteurs et de leur résistivité.

Nous adopterons pour le cuivre :

$$\beta_1 = 1 + 0{,}01 \cdot l'^4_1 (5\, \nu^2 - 1); \quad \beta_2 = 1 + 0{,}04 \cdot l'^4_2$$

l_1 — Largeur du plat primaire.

l_2 — Epaisseur de la plaque secondaire.

ν — Nombre des plats primaires, côte à côte dans une couche.

Si on ramène toutes les grandeurs au secondaire (voir § 2), on obtient pour la résistance totale d'expression suivante :

$$R_t = n^2_2 \left[\frac{\beta_2 \rho_2 (T + 2\, a_2 - b_2)}{m_2 S_2} + \frac{\beta_1 \rho_1 T}{n_1 S_1} \right] \text{ en } \mu\Omega.$$

On simplifie encore le calcul, en introduisant la notion des sections actives des conducteurs primaires : $\sigma_1 = n_1 S_1$;

et des conducteurs secondaires : $\sigma_2 = m_2 S_2$.

On obtient ainsi la formule définitive :

$$R_t = n^2_2 \left[\frac{\beta_2 \rho_2 (T + 2\, a_2 - b_2)}{\sigma_2} + \frac{\beta_1 \rho_1 T}{\sigma_1} \right] \text{ en } \mu\Omega.$$

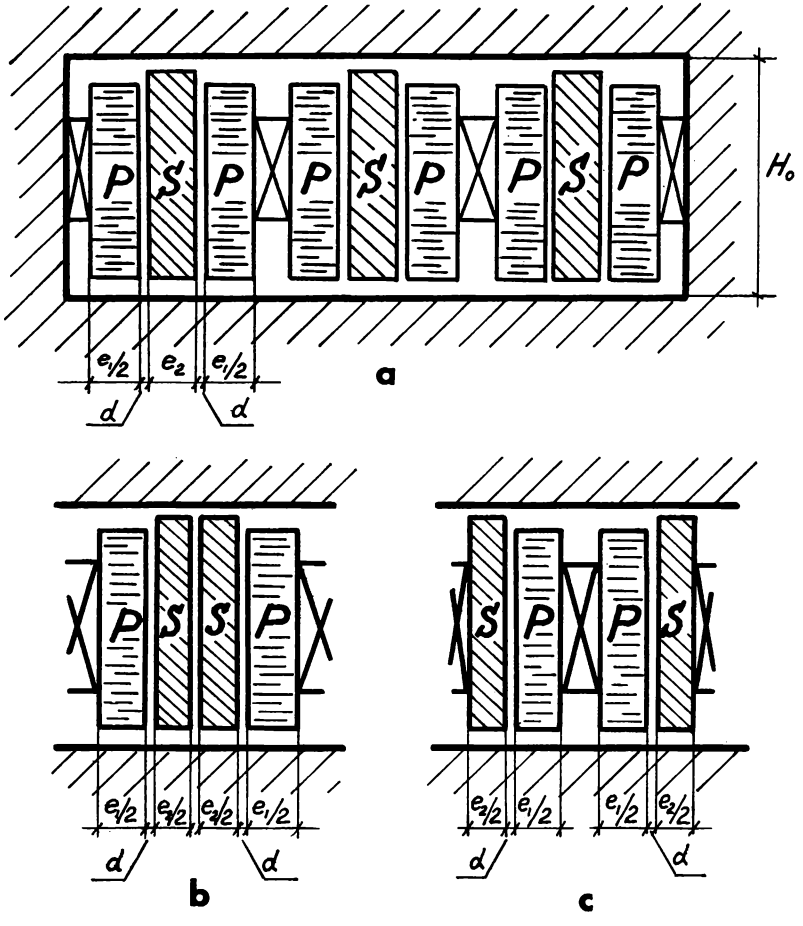


Fig. 435

Dispositions symétriques des enroulements du transformateur.

a — coupe partielle montrant la disposition d'enroulements en 3 groupes symétriques ($m = 3$),

b et *c* — exemples d'autres dispositions symétriques dans un groupe,

P — enroulement primaire,

— spire secondaire.

Bien que la substitution se rapporte à des sections primaires constantes, nous pouvons utiliser cette formule sans erreur appréciable pour des sections variables jusqu'au rapport 1 : 2.

Les résistivités seront prises du tableau de la page 481, mais en considérant cette fois qu'elles correspondent à l'état froid du transformateur ($\theta_1 = 15$ °C), car nous avons adopté (β) en conséquence. Pour calculer la résistance du transformateur à chaud, à une température ($\theta = \theta_1 + \Delta\theta$) nous utiliserons la formule :

$$R_{t\,\theta} = R_t \left(1 + \frac{\Delta\theta}{250}\right).$$

La réactance du transformateur sera calculée d'après la formule de Richter (Elektr. Maschinen — Berlin 1932). Cette formule s'applique aux transformateurs bobinés en galettes, réparties en groupes identiques et symétriques. Il s'agit de la disposition la plus courante, parce que la plus rationnelle, pour des transformateurs de soudage refroidis par eau (fig. 435). Pour d'autres dispositions, le lecteur peut consulter l'ouvrage cité.

Nous avons ajouté à cette formule un terme supplémentaire, particulier aux transformateurs de soudage, qui tient compte de la réactance des extrémités de raccordement extérieur du secondaire. (X_0) (Pour la simplification, nous avons négligé le couplage entre les boucles des sorties, quand il y en a plusieurs).

La réactance totale du transformateur, ramenée au secondaire (à 50 hz), s'exprime alors ainsi :

$$X_t = n_2^2 \left[\frac{X_0}{m_2} + 1{,}97\,\frac{\lambda T}{m H_0}\left(d + \frac{e_1 + e_2}{6}\right)\right] \text{ en } \mu\Omega$$

m — est le nombre de groupes symétriques des bobinages.

Le coefficient (λ) est une fonction du rapport $\dfrac{H_0}{2\,d + e_1 + e_2}$; si ce rapport est $\geqslant 1{,}25$, ce qui est généralement le cas dans les transformateurs refroidis par eau, on peut admettre $\lambda = 0{,}91$ et on a ainsi :

$$X_t = n_2^2 \left[\frac{X_0}{m_2} + 1{,}8\,\frac{T}{m \,.\, H_0}\left(d + \frac{e_1 + e_2}{6}\right)\right] \text{ en } \mu\Omega.$$

Toutes les dimensions doivent être exprimées en cm; elles sont indiquées à la figure 435, qui montre également les différentes dispositions symétriques possibles des bobinages dans un groupe.

L'impédance d'une sortie du secondaire (X_0) sera calculée d'après l'abaque de la figure 432, en prenant :

$$c_2 = 0{,}564 \sqrt{S_2}$$

et en calculant : $\varepsilon = f\left(\frac{a_2}{b_2}; \frac{a_2}{c_2}\right)$ $\quad X_0 = \varepsilon \cdot a$ en $\mu\Omega$.

S'il résultait du dessin que $b_2 > a_2$ il faut inverser ces notations, car l'abaque est établie pour $a \geqslant b$.

Ce calcul de réactances correspond au cas du remplissage complet des bobinages par le cuivre actif, c'est-à-dire, au fonctionnement sur la prise donnant la tension secondaire minimum. Pour calculer la réactance sur d'autres prises, il faut tenir compte de l'augmentation de la réactance, due à l'utilisation incomplète des enroulements primaires.

On substitue dans ce cas dans la formule précédente une valeur (H) réduite, à la place de (H_0), qu'on peut calculer de façon approximative d'après l'expression suivante :

$$H = H_0 \frac{\Sigma\, n_1 S_1}{\Sigma_0\, n_1 S_1}$$

où $\Sigma_0\, n_1 S_1$ est la section totale du cuivre bobiné au primaire et $\Sigma\, n_1 S_1 = \sigma_1$ est la section du cuivre utilisé (actif) au primaire sur la prise considérée.

Exemple : Calculons la résistance et la réactance du transformateur, alimentant la machine examinée au § précédent.

Nous relevons sur le plan du transformateur les dimensions suivantes :

$T = 93$ cm; $a_2 = 6{,}3$ cm; $b_2 = 7{,}5$ cm; $S_2 = 10$ cm^2; $l_2 = 1{,}6$ cm; $H_0 = 8{,}25$ cm; d $= 0{,}2$ cm.

Les bobinages sont répartis en 2 groupes et disposés suivant la figure 435 a. Les spires secondaires sont connectées en parallèle.

Le bobinage primaire est prévu pour 220 V. Sur la prise maximum il comporte 34 spires, et sur la prise minimum 60 spires. Les bobines sont constituées de plats de 2,0 cm de largeur, bobinés en spirale. La section totale du bobinage primaire est uniformément de 64 mm^2. Nous avons donc :

$l_1 = 2{,}0$ cm ; $S_1 = 0{,}64$ cm^2 ; $m_2 = 2$; $m = 2$; $n_1 = 34$ ou 60 ; $\nu = 1$; $e_1 = 4{,}0$ cm; $e_2 = 1{,}6$ cm.

Le bobinage primaire est exécuté en cuivre laminé et les spires secondaires en cuivre coulé, nous avons : $\rho_1 = 2{,}0$ $\mu\Omega$ cm et $\rho_2 = 2{,}5$ $\mu\Omega$ cm.

Calculons : $\beta_1 = 1 + 0{,}01 \times 2^4 \times (5 \times 1^2 - 1) = 1{,}64$

$\beta_2 = 1 + 0{,}04 \times 1{,}6^4 = 1{,}26$

$\sigma_1 = n_1 S_1 = 34 \times 0{,}64 = 21{,}8$ cm^2; ou $60 \times 0{,}64 = 38{,}4$ cm^2

$\sigma_2 = m_2 S_2 = 2 \times 10 = 20$ cm^2.

En introduisant ces valeurs dans la formule, nous obtenons la résistance ramenée au secondaire. Pour la prise maximum :

$$R_t = 1^2 \times \left[\frac{1{,}26 \times 2{,}5 \times (93 + 2 \times 6{,}3 - 7{,}5)}{20} + \frac{1{,}64 \times 2{,}0 \times 93}{21{,}8}\right]$$
$$= 15{,}5 + 14 = 29{,}5\ \mu\Omega$$

et pour la prise minimum :

$$R_t = 15{,}5 + \frac{1{,}64 \times 2{,}0 \times 93}{38{,}4} = 23{,}5\ \mu\Omega.$$

Calculons maintenant la réactance. Cherchons d'abord (X_0). Comme nous constatons que $b_2 = 7{,}5$ cm $> a_2 = 6{,}3$ cm, nous prendrons b_2 comme base du rectangle :

$$\frac{a}{b} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{7{,}5}{6{,}3} = 1{,}2; \qquad c_2 = 0{,}564\sqrt{10} = 1{,}8 \text{ cm}.$$

$$\frac{a}{c} = \frac{b_2}{c_2} = \frac{7{,}5}{1{,}8} = 4{,}2.$$

D'après l'abaque :

$$\varepsilon = 1{,}8 \text{ d'où } X_0 = 1{,}8 \times 7{,}5 = 13{,}5\ \mu\Omega.$$

Ayant la valeur de X_0 nous calculons, d'après la formule, la réactance ramenée au secondaire. Pour la prise minimum :

$$X_t = 1^2\left[\frac{13{,}5}{2} + 1{,}8\,\frac{93}{2 \times 8{,}25}\left(0{,}2 + \frac{4{,}0 + 1{,}6}{6}\right)\right] = 6{,}8 + 11{,}5 = 18{,}3\ \mu\Omega$$

et pour la prise maximum :

$$X_t = 6{,}8 + 11{,}5 \times \frac{38{,}4}{21{,}8} = 6{,}8 + 20{,}2 = 27{,}0\ \mu\Omega.$$

Etant en possession de ces valeurs nous pouvons calculer l'impédance du transformateur. Sur la prise minimum :

$$Z_t = \sqrt{23{,}5^2 + 18{,}3^2} = 29{,}8\ \mu\Omega$$

et sur la prise maximum :

$$Z_t = \sqrt{29{,}5^2 + 27{,}0^2} = 40\ \mu\Omega.$$

A titre de comparaison, nous donnons les résultats des mesures effectuées sur le même transformateur, en court-circuit :

Prise minimum : $R_t = 21{,}8\ \mu\Omega$; $Z_t = 29{,}8\ \mu\Omega$.

Prixe maximum : $R_t = 27{,}6\ \mu\Omega$; $Z_t = 40{,}7\ \mu\Omega$.

CALCUL DE LA PUISSANCE DU TRANSFORMATEUR

Etant en possession des valeurs de la résistance et de la réactance du transformateur et du circuit extérieur, nous pouvons calculer l'impédance globale et partant le courant secondaire.

$$Z = \sqrt{(X_e + X_t)^2 + (R_e + R_t)^2}, \text{ en } \mu\Omega;$$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z} \cdot 10^6 \text{ en A}; \quad \text{avec} \quad U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1}.$$

La connaissance du courant secondaire permet le calcul de la puissance apparente instantanée de la machine :

$$P = U_2 I_2 = U_1 I_1 \text{ en VA}$$

et du courant primaire :

$$I_1 = \frac{P}{U_1} = I_2 \frac{n_2}{n_1} \text{ en A.}$$

Remarques : Il ne faut pas oublier que U_1 représente la tension aux bornes mêmes du transformateur. En cas d'utilisation d'un contacteur ionique, cette tension est inférieure de la tension du réseau (U_r) (de 20 V environ), à cause de la chute dans les ignitrons. Dans ce cas, la puissance absorbée au réseau sera supérieure à celle absorbée par la machine même et égale à :

$$P_r = U_r \cdot I_1.$$

D'autre part, tous les calculs ont été faits en négligeant la composante magnétisante du courant primaire. Dans certains transformateurs, travaillant à forte induction (± 20 000 Gs), qu'on utilise surtout avec des faibles facteurs de marche, cette composante peut majorer le courant primaire de 5 à 10 %.

Si l'on connait la puissance conventionnelle de la machine et du transformateur (P_c), fixée par le constructeur et correspondant au facteur de marche de 50 %, on peut déterminer le facteur de marche pouvant être maintenu avec le courant calculé. (Voir page 105, projet de recommandations I.S.O.).

$$x = 50 \left(\frac{I_{2c}}{I_2}\right)^2.$$

I_{2c} — est le courant secondaire maximum correspondant au régime de marche de la machine de 50 %. Ce courant correspond généralement à l'utilisation de la machine avec la puissance conventionnelle sur la prise fournissant la tension secondaire maximum ($U_{2\,max.}$).

$$I_{2c} = \frac{P_c}{U_{2\,max.}}.$$

Si le transformateur devant alimenter la machine n'est pas encore connu, on estime d'abord sa tension secondaire à vide. En première approximation on peut se servir de la formule suivante :

$$U_2 = U_e \left(1 + 0{,}5\ \delta p \sqrt{\frac{n_2}{U_e \cdot x}}\right)$$

δp — étant la densité moyenne du courant,
admise dans le cuivre en régime de fonctionnement permanent, en A/mm².

En absence d'autres indications on posera :

$\delta p = 3$ pour le refroidissement par eau;

$\delta p = 1{,}5$ pour le refroidissement par air.

En se servant de cette valeur U_2 on calculera la puissance conventionnelle du transformateur :

$$P_c = U_2 \cdot I_{2c} = U_2\ I_2 \sqrt{\frac{X}{50}}$$

ce qui permettra de déterminer le type du transformateur et ses caractéristiques détaillées. Ensuite on pourra corriger la valeur de U_2 admise provisoirement, en se servant des valeurs X_t et R_t calculées de façon exacte.

Exemple 1 : Reprenons la soudeuse par points considérée précédemment, et faisons le calcul du courant de soudage, de la puissance et des cadences de fonctionnement, pouvant être maintenues, sur la prise maximum en soudage de tôles de 2 + 2 mm en acier doux.

Nous avons obtenu les résultats suivants lors du calcul des constantes du circuit :

— Pour le circuit extérieur : $X_e = 165\ \mu\Omega$; $R_e = 147{,}5\ \mu\Omega$.

— Pour le transformateur : $X_t = 27{,}0\ \mu\Omega$; $R_t = 29{,}5\ \mu\Omega$.

L'impédance totale du circuit sera égale à :

$$Z = \sqrt{(165 + 27)^2 + (147{,}5 + 29{,}5)^2} = 261\ \mu\Omega.$$

La soudeuse étant commandée par un contacteur à ignitrons, la tension aux bornes primaires sera de : $U_1 = 220 - 20 = 200$ V.

Nous calculons la tension secondaire à vide et le courant de soudage :

$$U_2 = 200\ \frac{1}{34} = 5{,}9\ \text{V}; \qquad I_2 = \frac{5{,}9 \times 10^6}{261} = 22\,600\ \text{A}.$$

Avec cette intensité on peut faire un point de soudure en 3 périodes (sur tôles 2 + 2 mm). Ce réglage n'est pas recommandable en pratique car le refroidissement du point soudé est trop brusque, mais pour le calcul on peut accepter cette hypothèse.

La puissance instantanée aux bornes de la machine serait de :

$$P = 5{,}9 \times 22\,600 = 134\,000 \text{ VA} = 134 \text{ kVA}$$

Le courant primaire :

$$I_1 = \frac{134\,000}{200} = 670 \text{ A}$$

et la puissance instantanée, absorbée au réseau :

$$P_r = 670 \times 220 = 147\,000 \text{ VA} = 147 \text{ kVA}.$$

En supposant que le constructeur indique pour le transformateur équipant cette soudeuse, une puissance conventionnelle de 50 kVA avec un facteur de marche de 50 %, le courant secondaire maximum correspondant à ce facteur de marche sera de :

$$I_{2c} = \frac{50\,000}{5{,}9} = 8\,460 \text{ A}.$$

Nous pourrons donc souder avec un facteur de marche de :

$$\chi = 50 \left(\frac{8\,460}{22\,600}\right)^2 = 7 \text{ \%}.$$

D'où résultent : l'intervalle du temps entre 2 soudures et la cadence moyenne maximum :

$$\text{Intervalle} : \frac{3}{7} \cdot 100 = 43 \text{ périodes}; \qquad \text{Cadence} : \frac{50 \times 60}{43} = 70 \text{ points/mn}.$$

Exemple 2 : Supposons maintenant que pour obtenir une meilleure qualité des points nous voudrions souder avec un courant de 15 000 A en 7 périodes. Si nous ne disposons pas d'un moyen de réglage de courant électronique, nous devons baisser la tension du transformateur. Quelle prise faut-il prévoir ?

Nous voyons d'abord que cette prise ne sera pas éloignée du réglage minimum. En effet le rapport $\frac{15\,000}{22\,600}$ est assez proche du rapport du nombre des spires $\frac{34}{60}$. Nous calculons les valeurs R_t et X_t correspondant au réglage minimum :

$$Z = \sqrt{(165 + 18{,}3)^2 + (147{,}5 + 23{,}5)^2} = 251 \text{ } \mu\Omega$$

et $U_2 = 15\,000 \times 251 = 3{,}77$, ce qui correspond à $\frac{200 \times 1}{3{,}77} = 53$ spires primaires.

Le courant primaire sera de :

$$I_1 = \frac{15\,000}{53} = 283 \text{ A}.$$

La puissance absorbée au réseau :

$$P_r = 220 \times 283 = 62\,000 \text{ VA} = 62 \text{ kVA}.$$

Calculons enfin le facteur de marche admissible et l'intervalle moyen minimum entre les soudures :

$$\chi = 50 \left(\frac{8\,460}{15\,000} \right)^2 = 16\ \%.$$

Intervalle : $\frac{7}{16} \cdot 100 = 44$ périodes; Cadence : $\pm$ 70 points/mn.

Nous voyons que la modification des paramètres de réglage n'a eu aucune influence sur la cadence de soudage pouvant être supportée par la machine. Ceci découle du fait que les échauffements de la machine et des points soudés sont régis par la même loi : la loi Joule.

Exemple 3 : Supposons maintenant, que nous voulions souder avec la même machine des tôles d'aluminium de 1,5 + 1,5 mm d'épaisseur. Quel transformateur faut-il prévoir ?

D'après le tableau E page 78, il faut prévoir les réglages de base suivants :

$$I_2 = 34\,000 \text{ A} \qquad t = 12 \text{ périodes.}$$

La résistance électrique du point de soudure sera de l'ordre de 20 $\mu\Omega$, ce qui donnera :

$$R_e = 57{,}5 + 20 = 77{,}5\ \mu\Omega; \qquad Z_e = \sqrt{165^2 + 77{,}5^2} = 182\ \mu\Omega$$

$$U_e = 34\,000 \times 182 \times 10^{-6} = 6{,}18 \text{ V.}$$

Calculons le facteur de marche admissible :

$$\chi = 50 \left(\frac{8\,460}{34\,000} \right)^2 = 3{,}1\ \%$$

et la tension à vide :

$$U_2 = 6{,}18\ (1 + 0{,}5 \times 3 \times \sqrt{\frac{1}{6{,}18 \times 3{,}1}} = 8{,}3 \text{ V.}$$

Ce transformateur devra avoir une puissance conventionnelle de :

$$P_c = 8{,}3 \times 8\,460 = 70\,000 \text{ VA} = 70 \text{ kVA}$$

avec un facteur de marche de 50 %.

Sur la base de ces données nous pouvons choisir le transformateur qui convient. Prenons par exemple un type de 80 kVA dont la réactance est de 34 $\mu\Omega$ et la résistance de 31 $\mu\Omega$, on aura :

$$Z = \sqrt{(165 + 34)^2 + (77{,}5 + 31)^2} = 227\ \mu\Omega$$

et la valeur exacte de $U_2 = 34\,000 \times 227 \times 10^{-6} = 7{,}75$ V correspondant à $\frac{200}{7{,}75} = 26$ spires.

Le courant primaire sera de : $\frac{34\,000}{26} = 1\,300$ A et la puissance absorbée au réseau : $1\,300 \times 220 = 286\,000$ VA $= 286$ kVA.

LES CRITÈRES DÉTERMINANT LE CHOIX DES MATIÈRES MAGNÉTIQUES COMPOSANT LE NOYAU D'UN TRANSFORMATEUR DE SOUDAGE

Les transformateurs de soudage par résistance étant des appareils fonctionnant en régime intermittent, les critères régissant le choix des matières magnétiques ne sont pas les mêmes que pour les appareillages fonctionnant en permanence, comme transformateurs de distribution, bobines de self-induction, moteurs, etc.

Dans les transformateurs de soudage, la qualité des matières utilisées sera principalement déterminée par le facteur de marche prévu en fonctionnement, les autres facteurs viendront ensuite, les pertes à vides, en dernier lieu, car ce genre de transformateurs ne fonctionne jamais à vide ni en faible charge.

Pour les transformateurs fonctionnant avec un faible facteur d'utilisation, ne dépassant pas 10 %, c'est-à-dire pour la majorité des transformateurs destinés à la soudure par points des tôles minces, nous pouvons négliger l'influence des pertes dans le fer et le choix se portera vers les tôles magnétiques présentant le maximum de perméabilité aux inductions très élevées. Cette condition est le mieux remplie par des tôles à faible teneur de silicium, l'adjonction de ce dernier ayant comme effet la diminution de la perméabilité du fer.

Dans ce cas on n'aura aucun intérêt d'utiliser des tôles à forte teneur en silicium même celles à cristaux orientés (dites hypersil).

Ceci s'explique par le mécanisme même du processus d'aimantation des tôles. Dans les tôles à cristaux orientés, le traitement d'orientation permet de ranger les molécules dans une ou deux directions privilégiées, ce qui diminue l'énergie nécessaire pour leur orientation lors de l'aimantation. On obtient ainsi de très faibles pertes par hystérésis et une perméabilité magnétique très grande aux inductions qui sont considérées comme élevées dans la construction des appareillages classiques. Toutefois, dès que nous nous approchons de la saturation magnétique, en créant un champ suffisamment élevé, on parvient à orienter la presque totalité des molécules, même dans une tôle non traitée. A partir de ce moment la perméabilité n'est plus qu'une fonction de la distance entre les molécules polarisées et elle dépend donc uniquement de la composition du métal et devient d'autant plus grande que la teneur en silicium est plus basse.

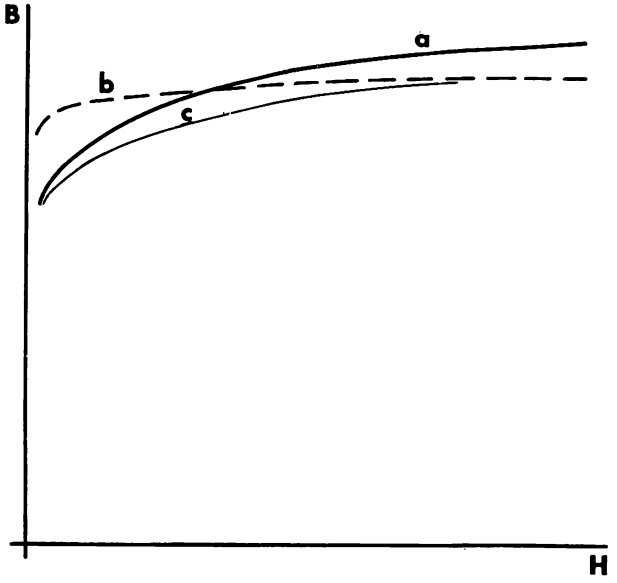


Fig. 436

Courbes d'induction en fonction du champ magnétique,
dans la région des fortes inductions, pour les différentes qualités des tôles magnétiques.

a — tôle à faible teneur de silicium,
b — tôle à cristaux orientés,
c — tôle à forte teneur de silicium.

La figure 436 qui montre l'allure des courbes d'aimantation se rapportant à diverses qualités de tôles magnétiques, dans la région des fortes inductions, illustre bien ce phénomène.

Dans les transformateurs dont le facteur de marche dépasse 10 %, nous ne pouvons plus négliger l'importance que prend dans le bilan thermique, l'augmentation des pertes à vide due à l'utilisation aux inductions élevées de tôles à faible teneur en silicium. Dans ce cas on peut être amené pour des raisons d'encombrement, de poids, ou même économiques, à utiliser dans certains transformateurs des tôles à cristaux orientés.

Enfin pour les transformateurs travaillant à un facteur de marche élevé, mais où le poids et l'encombrement jouent un rôle secondaire, comme par exemple ceux équipant les soudeuses au galet, on peut avoir un avantage économique d'utiliser des tôles à forte teneur en silicium, mais non traitées.

ADAPTATION DES CALCULS A DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES DE 50 HZ

Quand la différence entre la fréquence donnée et 50 Hz n'est pas très grande (inférieure à 25 %), on peut considérer que la résistance (R_f) du circuit reste constante et que la réactance (X_f) varie proportionnellement à la fréquence :

$$R_f = R \qquad X_f = X \frac{f}{50}$$

f étant la fréquence considérée, R et X, respectivement les valeurs de la résistance et de la réactance à 50 Hz.

S'il s'agit d'une machine existante il suffira pour passer d'une fréquence à l'autre de modifier la tension secondaire du transformateur, de façon à obtenir le même courant secondaire sur l'impédance modifiée :

$$Z_f = \sqrt{R^2_f + X^2_f} \qquad U_{2f} = I_2 Z_f = U_2 \frac{Z_f}{Z}.$$

En changeant le nombre de spires primaires, il ne faut pas oublier de réadapter leur section à la nouvelle puissance conventionnelle, résultant du changement de la tension secondaire :

$$P_{cf} = I_{2c} U_{2f}.$$

Le nombre de spires secondaires restant inchangé, le nombre d'ampères-tours secondaires et primaires reste également inchangé, la réadaptation de la section primaire se résume à la conservation du même remplissage (σ) des bobines primaires.

Dans la plupart des machines fixes, où le facteur de puissance est inférieur à 0,5, on peut sans autres calculs modifier la tension secondaire du transformateur proportionnellement à la fréquence. On néglige la répercussion de la légère variation des pertes sur l'échauffement du transformateur.

Si l'écart de fréquences dépasse 25 %, on doit procéder à des calculs plus détaillés. Il faut tenir compte non seulement de la variation de la réactance, sensiblement proportionnelle à la fréquence du réseau, mais également de la variation de la résistance, résultant de la modification des pertes supplémentaires.

Les lois de variation des différentes pertes en fonction de la fréquence n'étant pas les mêmes, il faut procéder à l'analyse de chaque cas particulier. Pour des fréquences très basses, inférieures à 25 Hz, on peut négliger les pertes supplémentaires et confondre la résistance du circuit en courant alternatif, avec celle en courant continu.

MACHINES ALIMENTÉES PAR UN RÉSEAU TRIPHASÉ

On utilise actuellement 5 principaux types de machines à souder par résistance, alimentées en courant triphasé :

— A redresseur.

— A changement de fréquence (en fréquence plus basse).

— A fréquence musicale.

— A redresseur et accumulation statique d'énergie dans les condensateurs.

— A plusieurs circuits de soudage, répartis entre les phases.

Nous n'analyserons pas les deux derniers systèmes.

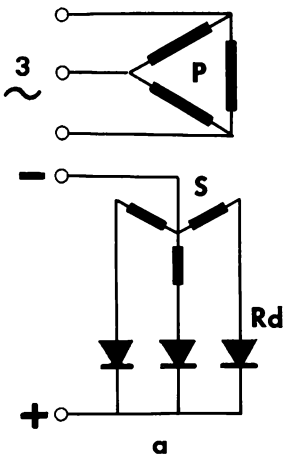
Les machines à accumulation d'énergie et alimentation triphasée, sont encombrantes et d'un prix élevé.

Elles ne remplacent que très rarement les soudeuses à redresseur, ou à changement de fréquence, dans les cas où on doit limiter les pointes d'appel de puissance. Le calcul de leur circuit de soudage et du transformateur présente une forte analogie avec le calcul du circuit d'une soudeuse à changement de fréquence.

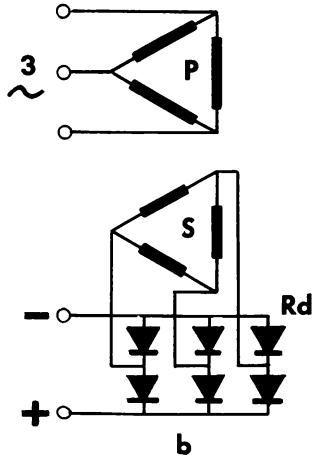
La batterie des condensateurs est calculée en fonction de l'énergie nécessaire pour une soudure, du rendement de la machine et du potentiel inutilisable, ce dernier dépendant partiellement du système de commutation adopté.

Les machines à souder à circuits multiples se rencontrent surtout parmi les machines spéciales.

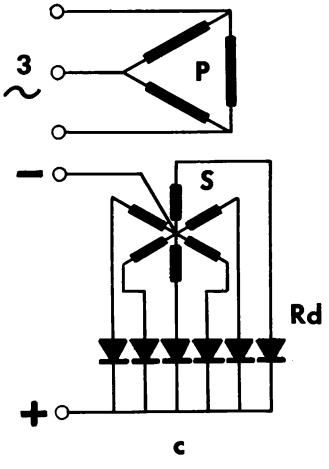
Les dispositions adoptées varient d'un cas à l'autre. Il faut les considérer comme des combinaisons de circuits monophasés, en tenant compte dans les calculs de la composition vectorielle des différents courants et tensions, déphasés d'une phase à l'autre.



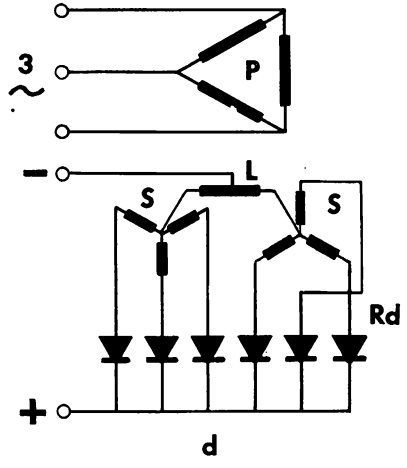
Redresseur en étoile - une alternance



Redresseur en pont triphasé.



Redresseur tri-hexaphasé (double étoile).



Redresseur en double étoile avec un self inter-phases.

Fig. 437

Montage des redresseurs triphasés.

P — enroulements primaires
S — enroulements secondaires
Rd — éléments redresseurs
L — self inter-phases

MACHINES A SOUDER A REDRESSEUR

Ces machines sont utilisées surtout pour le soudage par points de tôles d'alliages légers d'épaisseur moyenne et en général partout où des appels importants, mais pas trop prolongés de puissance sont nécessaires. Elles permettent de répartir cette puissance entre les phases du réseau, avec un excellent équilibre et un facteur de puissance particulièrement élevé, inégalé par aucun autre système.

Les redresseurs utilisés actuellement, sont à de rares exceptions près des redresseurs à semi-conducteurs, dits « secs ». Ils sont les seuls, parmi les redresseurs statiques, à présenter des chutes de tension suffisamment basses pour obtenir des rendements intéressants. Leur emploi présente, en dehors de ce que nous avons cité, un grand avantage de simplicité du principe, leur extension est toutefois freinée par le coût élevé des unités de grande puissance et leur relativement faible capacité thermique, limitant les possibilités de surcharges prolongées.

Nous donnons ci-après un petit aperçu sur la façon de déterminer les éléments d'un circuit d'une soudeuse équipée d'un redresseur monté en pont triphasé. C'est le cas le plus simple et le plus couramment utilisé en pratique. Le schéma est représenté à la figure 437.

Le circuit extérieur n'oppose ici au passage du courant que sa résistance en courant continu. Nous mettons un accent particulier sur l'importance que prend cette fois l'estimation de la résistance des contacts et des pièces soudées. Ces résistances doivent en pratique être déterminées expérimentalement. Elles doivent aussi être conservées aussi constantes que possible. Il en résulte des précautions à prendre pour la stabilisation des contacts entre les conducteurs (argentage, enduits) et des tôles soudées (nettoyage, décapage, etc.).

La réactance du circuit ne devra être prise en considération que dans le cas de soudage par des impulsions très courtes. Elle retarde en effet la croissance et ensuite la décroissance du courant, suivant la loi exponentielle (fig. 438).

$$i = I\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \qquad \text{et} \qquad i = I\, e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Dans un circuit de soudage courant, comportant les bras de machines rapprochés au maximum, on mesure à 50 Hz un rapport $\frac{R}{X}$ voisin de 0,5 ; ceci correspond au rapport :

$$\frac{R}{L} = \frac{314 \,.\, R}{X} = 150.$$

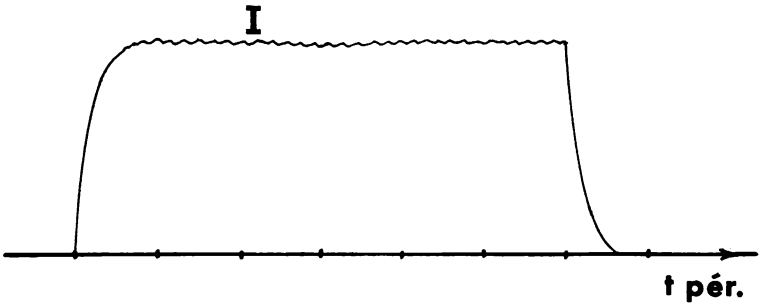


Fig. 438

Forme d'impulsion du courant de soudage
dans une machine à souder triphasée à redresseur.

On remarque l'établissement progressif du courant et le retard de la coupure, dus à la self-induction du circuit, ainsi qu'une légère ondulation provenant du processus de redressement.

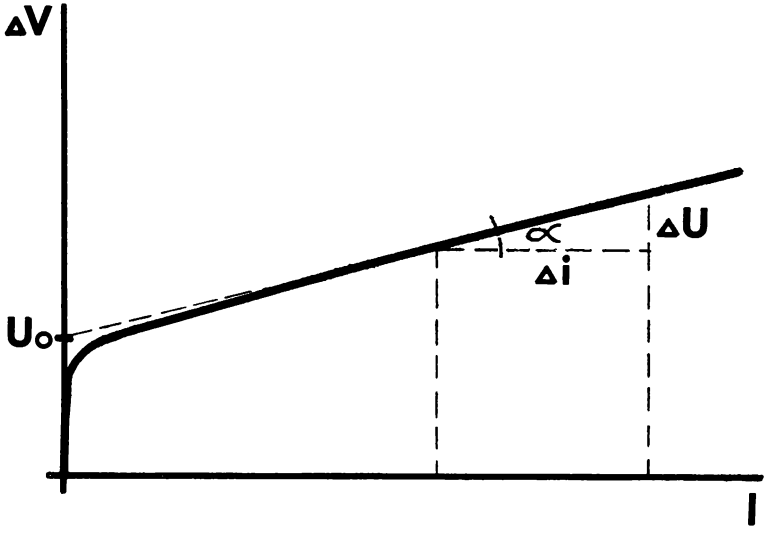


Fig. 439

Chute de tension dans un élément redresseur à semi-conducteur.

u_0 : chute constante (seuil de redressement)

$\frac{\Delta u}{\Delta i} = \text{tg } \alpha$: résistance dynamique

Ceci signifie qu'après 1/150 de seconde le produit $\frac{R}{L}$ atteint la valeur de l'unité. On a à ce moment :

$$i = I\left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0{,}63\ I.$$

On peut donc dire que dans la majorité des cas l'établissement de courant dans une soudeuse à redresseur s'effectue dans un temps de l'ordre de 0,5 période.

Il en est de même pour sa coupure.

En dehors de ce régime transitoire, on peut écrire que la tension aux bornes du circuit extérieur sera égale à :

$$V_e = I\left(\Sigma \frac{\rho_i\, l_i}{S_i} + \Sigma r + R_s\right)$$

Σr — étant la somme des résistances des contacts entre les éléments conducteurs.

La résistance propre du redresseur représente une part importante de la résistance totale du circuit de la soudeuse. Cette résistance n'est pas constante, elle varie avec l'intensité du courant débité. La loi de variation dépend du genre de redresseur utilisé. L'allure générale de la chute de tension dans un élément redresseur est représentée à la figure 439. On remarque que dans les redresseurs travaillant à forte charge, ce qui est toujours le cas des redresseurs de soudage, on peut assimiler cette courbe à une droite, décalée par rapport à l'origine d'une valeur initiale u_0, correspondant à une valeur (fictive) de chute de tension, avec le débit nul. La valeur (u_0) ne dépend pas des dimensions de l'élément, elle dépend uniquement du genre de semi-conducteur et elle est comprise entre 0,5 et 1 V pour la plupart des semi-conducteurs utilisés actuellement. La pente de la droite :

$$R_d = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta u}{\Delta i}$$

représente la résistance dynamique de l'élément redresseur, elle se comporte comme une résistance ordinaire, soumise à la loi d'Ohm.

La chute de tension dans un redresseur complet sera exprimée par l'équation suivante. Dans cette équation, n_s signifie le nombre d'éléments redresseurs que le courant doit parcourir en série (2 dans un pont triphasé à 6 éléments) et n_p le nombre d'éléments connectés en parallèle dans une branche du redresseur :

$$\Delta V = n_s\left(u_0 + I\,\frac{R_d}{n_p}\right).$$

Le courant I doit être considéré comme le courant moyen parcourant une branche de redresseur. La moyenne du courant doit être faite pendant la période de conduction de la branche. Dans un redresseur, monté en pont triphasé, I est égal au courant total débité.

A la figure 437 sont représentés quelques schémas de couplage de redresseurs triphasés. A chacun de ces couplages correspondent des formules permettant de calculer les valeurs théoriques du courant, de la tension moyenne redressée, du courant de phase, etc. On trouve ces formules dans la plupart des catalogues des firmes fabriquant des éléments redresseurs.

En faisant le calcul de la puissance du transformateur destiné à l'alimentation du redresseur, on doit tenir compte du fait que les courants parcourant les enroulements ne sont généralement pas sinusoïdaux. Ils correspondent à une recomposition d'une série de courants pulsatoires. De ce fait les formules classiques ne sont plus d'application et doivent être adaptées à chaque cas, par exemple au moyen de l'analyse harmonique.

Le montage de redresseurs, en pont triphasé, dont nous nous préoccupons ici, a l'avantage de réaliser la recomposition déjà presque totale, de courants alternatifs sinusoïdaux dans les conducteurs d'alimentation du pont. Les courants étant ainsi peu déformés, on peut calculer le transformateur, comme simple transformateur triphasé, débitant au secondaire un courant égal à 0,82 I et fournissant en charge une tension alternative entre-phases égale à :

$$\frac{V}{1{,}35}; \quad \text{où} \quad V = V_e + \Delta V.$$

Tous les couplages de transformateurs triphasés, pouvant être chargés de façon déséquilibrée au secondaire, peuvent être utilisés. Le couplage étoile-étoile est à proscrire, car le déséquilibre momentané des phases (le transformateur débitant pendant chaque 1/6 de période en circuit monophasé), entraînerait des chutes de tension prohibitives et des surtensions dangereuses pour la vie du redresseur. Pour les mêmes raisons, il est conseillé d'éviter une réactance exagérée des enroulements du transformateur.

Il faut attribuer une attention particulière à la détermination exacte de la tension maximum inverse, à laquelle sont soumis les éléments, les redresseurs secs pouvant être irrémédiablement détruits par une application, même momentanée, d'une tension inverse supérieure à la limite admise. Il importe donc de tenir compte non seulement de la tension inverse théorique, mais également des surtensions accidentelles ou transitoires pouvant survenir en service, suite par exemple aux brusques changements de régime, coupures et enclenchements non synchrones, oscillations parasites à fréquence élevée, etc.

Dans les redresseurs montés en pont triphasé, la tension inverse théorique atteint $U_2 \sqrt{2}$ par branche du pont, U_2 — étant la tension secondaire du transformateur, entre-phases, à vide. La tension inverse nominale des éléments doit atteindre au moins le double de cette valeur, pour tenir compte des phénomènes transitoires.

La puissance du transformateur d'alimentation d'un redresseur monté en pont triphasé sera calculée à partir de la puissance en courant continu $V.I.$ La puissance débitée au secondaire sera égale à :

$$P_2 = 0{,}82 \cdot I \cdot \frac{V}{1{,}35} \sqrt{3} = 1{,}05 \; V.I.$$

Nous obtiendrons la puissance primaire, en ajoutant les pertes (réelles) du transformateur, la puissance réactive pouvant être négligée à cause du facteur de puissance élevé de l'ensemble.

La détermination de la puissance conventionnelle et du facteur de marche admissible à un régime donné est plus délicate, car la chute de tension dans le redresseur n'étant pas linéaire, les pertes provoquant son échauffement ne sont pas proportionnelles au carré du courant. De ce fait l'emploi de la formule :

$$x'' = x' \left(\frac{I'}{I''}\right)^2 \text{ conduit à des résultats erronés.}$$

Pour cette raison le constructeur du redresseur fournit généralement une courbe des charges admissibles en fonction du facteur de marche pour une gamme d'utilisation donnée. D'autre part, l'inertie thermique du redresseur étant peu élevée, cette courbe portera l'indication du temps d'intégration maximum pouvant être admis pour le calcul du facteur de marche. Cette courbe aura une allule analogue aux courbes permettant de déterminer le facteur de marche des ignitrons.

Pour le cas où l'on n'est pas en possession de ces courbes, on peut quand même dire qu'en général l'emploi de la formule des carrés d'intensité pour la détermination du facteur de marche d'un redresseur, conduit à une surestimation de ce facteur, quand l'intensité de courant considérée est inférieure à celle de référence, et à la sous-estimation dans le cas contraire.

MACHINES A CHANGEMENT DE FRÉQUENCE EN BASSE FRÉQUENCE

On utilise ces machines pour les mêmes utilisations que les machines à souder à redresseur, en étant moins limité toutefois par les possibilités de surcharge. On les utilise particulièrement pour les travaux lourds et le soudage par pulsations. Pour ce dernier genre de travail, le principe de changement de fréquence s'accordant particulièrement bien avec le mode de fonctionnement de la machine.

Une analyse poussée de ce système a été présentée dans le numéro d'octobre 1949 de *Welding Journal* par W.K. Boice.

Nous en rappellerons quelques points essentiels.

Le schéma du circuit électrique de cette machine est représenté à la figure 440.

Le principe est basé sur l'alimentation des bobines primaires par les courants redressés dans les ignitrons et circulant dans le même sens, ceci pendant un certain intervalle de temps, puis leur inversion, pendant un second intervalle de même durée et ainsi de suite. On obtient ainsi au secondaire une tension alternative de forme plus ou moins rectangulaire, dont la période fondamentale est égale au double du temps de conduction primaire dans une direction. On ne compte pas le temps du repos éventuel avant l'inversion.

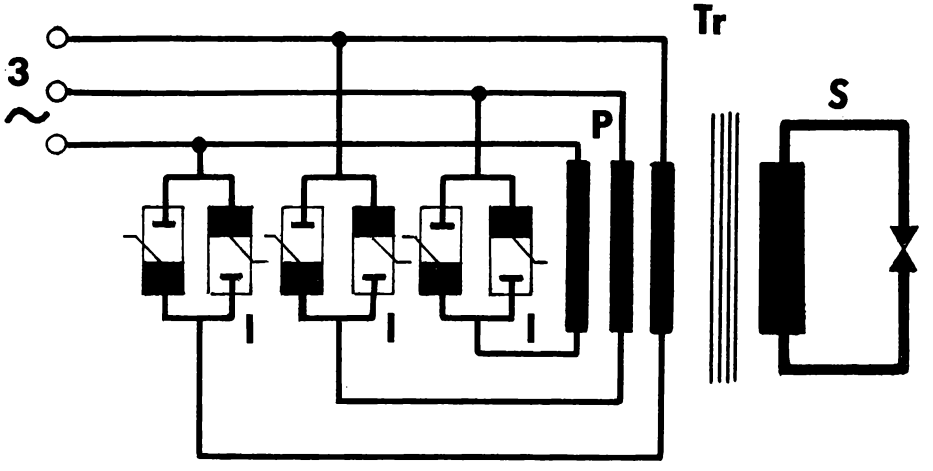


Fig. 440

Schéma d'une soudeuse à changement de fréquence.

Tr — transformateur
P — bobines primaires
S — circuit secondaire
I — ignitrons redressant et commutant les courants parcourant les bobines primaires

Théoriquement, il n'y a pas de limitation vers le bas des fréquences pouvant être ainsi obtenues. Pratiquement, le volume et le poids du transformateur nécessaire les limitent à 5 - 6 Hz. En effet, les quantités d'énergie magnétique devant être emmagasinées dans le circuit magnétique du transformateur deviennent d'autant plus élevées, que la fréquence est plus basse.

D'autre part on doit limiter l'induction, pour éviter toute saturation du circuit magnétique, qui donnerait lieu à l'apparition vers la fin de chaque demi-période d'un courant magnétisant trop important, perturbant le fonctionnement de l'ensemble.

Si on désigne par : E_f; S_f; f; respectivement : la force électromotrice par spire, la section du fer et la fréquence secondaire de la machine à changement de fréquence, E; S; 50; étant les valeurs correspondantes pour une soudeuse monophasée à 50 Hz, on peut écrire les relations suivantes :

$$E_f = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} 10^{-8}\,; \qquad B_f = \frac{\Phi \text{ max.}}{S_f} = \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot \frac{T}{4}}{S_f} = \frac{E_f}{4 \,.\, S_f \,.\, f} 10^8$$

$$B = \frac{E}{4{,}44 \,.\, S \,.\, 50}.$$

Si nous situons le rapport des inductions admissibles $\frac{B_f}{B}$ à environ 0,55; nous aurons :

$$\frac{S_f}{S} = \frac{E_f \,.\, 4{,}44 \,.\, 50}{E \,.\, 4 \,.\, f \,.\, 0{,}55} = 2\,\frac{E_f \,.\, 50}{E \,.\, f}.$$

Comme d'autre part, grâce à la réduction de la réactance du circuit secondaire, la force électromotrice peut être diminuée à environ moitié de ce quelle était dans une soudeuse monophasée, on aura approximativement :

$$\frac{S_f}{S} = \frac{50}{f}.$$

La section du noyau magnétique d'une soudeuse à changement de fréquence sera donc augmentée en rapport inverse de celui de diminution de la fréquence.

S'il est par exemple courant de disposer dans une soudeuse monophasée à 50 Hz d'un transformateur dont la section du noyau magnétique est de 200 cm², une soudeuse à changement de fréquence de mêmes performances mais fonctionnant à une fréquence de 6 Hz devra être équipée d'un transformateur dont le noyau mesurera :

$$\frac{50}{6} \times 200 = 1\,600 \text{ cm}^2 \text{ de section.}$$

Le volume et le poids de ce transformateur sera encore augmenté davantage par le fait d'une mauvaise utilisation du cuivre constituant les enroulements primaires. Chaque bobinage primaire n'est en effet parcouru, que par des impulsions de courant, durant chacune 1/3 de période. De ce fait la somme des valeurs efficace des courants primaires est $\sqrt{3}$ fois plus grande que la valeur efficace du courant secondaire, ce qui oblige d'augmenter dans ce rapport le volume des bobinages primaires.

Le calcul du circuit secondaire des soudeuses à changement de fréquence s'opère de la même façon que pour les machines monophasées fonctionnant à des fréquences plus basses que 50 Hz. Comme il s'agit généralement des fréquences inférieures à 25 Hz, on négligera les pertes supplémentaires en

courant alternatif, en prenant comme valeur de résistance, celle correspondant au courant continu. La réactance sera proportionnelle à la fréquence :

$$X_f = X \frac{f}{50}.$$

On aura donc :

$$Z_f = \sqrt{R_0{}^2 + X^2{}_f} \qquad \text{avec} \qquad R_0 = \Sigma \frac{\rho_i \, l_i}{S_i} + pr + R_s.$$

Suite à la diminution sensible de la réactance on devra, comme dans les machines à redresseur, fixer de façon exacte la résistance des contacts et des pièces soudées.

En connaissant l'impédance secondaire, on calcule la tension secondaire en charge :

$$E = k \, I_2 \, Z_f.$$

Le coefficient k tient compte de la présence des harmoniques dans le courant I_2. Généralement $k = 1{,}1$.

Pour calculer la tension secondaire à vide (E_0) il faut connaître également les chutes de tension dans le transformateur, qui se décomposent en :

— Chute ohmique, due à la résistance du transformateur et à la réactance des fuites magnétiques entre les bobines primaires.

— Chute inductive, due à la réactance de dispersion entre le primaire et le secondaire (voir l'article de W.H. Boice précité).

La puissance maximum instantanée du transformateur sera égale à :

$$P_2 = \frac{E_0 \, I_2}{\cos \varphi_0}$$

$\cos \varphi_0$ représente dans cette expression le facteur de distorsion, dû à la déformation du courant primaire. Il est égal à 0,82 environ. A cause de la présence de ce facteur, le facteur de puissance des machines à changement de fréquence ne peut pas dépasser cette valeur; il reste donc inférieur à celui des machines équipées d'un redresseur monté en pont qui se rapproche de 0,95.

Enfin nous attirons l'attention sur 2 derniers points, concernant ces machines :

1. On ne gagne pratiquement plus en puissance absorbée par la machine si on réduit la fréquence de travail en dessous de la valeur correspondante au rapport : $\frac{X_f}{R} = 0{,}6$, ce qui correspond dans les machines courantes à une fréquence comprise entre 10 et 15 Hz.

2. Il existe un minimum du rapport entre la résistance et la réactance du circuit, qu'on ne doit pas dépasser; ceci, pour éviter les extra-courants après l'inversion de polarisation et les rétro-allumages des ignitrons. Le facteur de puissance du circuit, calculé à 50 Hz ne doit pas être inférieur à 0,29 (0,33 si la commutation du courant s'effectue sans intervalle de repos).

MACHINES A SOUDER A FRÉQUENCE MUSICALE

Ce type d'alimentation est utilisé pour faciliter la solution des cas, où l'encombrement (ou le poids) des transformateurs à 50 Hz présente de sérieux inconvénients, par exemple dans les soudeuses portatives (transformateurs-pinces), dans certaines machines multipoints et dans d'autres machines spéciales, où on voudrait placer le transformateur à proximité immédiate de la pièce soudée, tout en ne disposant que d'un espace très réduit.

Le courant triphasé du réseau est transformé par un convertisseur, généralement rotatif, en courant à fréquence musicale, par exemple 400 Hz. Le courant est amené par câbles, à un transformateur, dont le secondaire est relié directement aux électrodes de soudage. Grâce à la fréquence élevée d'alimentation la section du fer peut être très fortement réduite, ce qui permet de réduire également le poids et l'encombrement du transformateur. Par contre, pour conserver cet avantage, on est obligé de comprimer le développement du circuit secondaire au strict minimum et l'éloigner des masses magnétiques pour réduire sa réactance.

Il faut réduire la section des conducteurs pour éviter des pertes supplémentaires, très importantes à cette fréquence.

Des précautions doivent être également prises pour les câbles primaires, leur réactance et même capacité n'étant plus négligeables à cette fréquence.

Ces conditions, ainsi que la nécessité d'installation d'un convertisseur, limitent l'utilisation de ce système aux cas mentionnés plus haut et à certaines applications spéciales ne pouvant pas être résolues au moyen de machines à 50 Hz.

CALCUL DU DÉBIT D'EAU DE REFROIDISSEMENT DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES

Nous donnons ci-après quelques indications sur la façon d'estimer le débit d'eau nécessaire pour le refroidissement d'une machine en l'absence d'éléments de calcul précis.

Nous nous baserons sur l'évaluation du rapport (χ), entre la fraction de la chaleur évacuée par l'eau et la totalité de la chaleur dégagée dans la machine. Comme point de départ nous prenons la puissance apparente absorbée par la machine en régime équivalent permanent (P_p), exprimée en kVA, calculée à partir soit des données du régime de fonctionnement réel, soit de la puissance conventionnelle en régime de marche de 50 % (P_c).

$$P_p = P\sqrt{\frac{x}{100}} \qquad \text{ou} \qquad P_p = P_c\sqrt{\frac{50}{100}}.$$

La partie réelle de cette puissance est transformée en chaleur :

$$Q = 860\ P_p \cos\varphi \quad \text{en kcal/heure}$$

le coefficient 860 représente l'équivalent de 1 kWh en kcal.

La quantité de chaleur évacuée par l'eau s'exprimera par :

$$q = 860\ \chi\ P_p \cos\varphi$$

et si l'on admet une élévation de température entre l'entrée et la sortie du circuit de refroidissement de $\Delta\theta$ en °C, on aura pour le débit d'eau en l/heure l'expression suivante :

$$D = \frac{860\ \chi\ P_p \cos\varphi}{\Delta\theta}.$$

Dans la plupart des machines à souder fixes on peut admettre les coefficients suivants :

$$\cos\varphi = 0{,}5; \quad \chi = 0{,}3; \quad \Delta\theta = 15\ ^\circ\text{C}.$$

Ce qui donne après la substitution :

$$D = 8{,}6\ P_p \text{ en l/heure } (P_p \text{ étant en kVA}).$$

Pour les installations équipées des câbles secondaires souples et non inductifs, nous poserons :

$$\cos\varphi = 0{,}75; \quad \chi = 0{,}8; \quad \Delta\theta = 35\ ^\circ\text{C}.$$

et nous obtenons la formule :

$$D = 15\ P_p \text{ en l/heure.}$$

A ces valeurs il faut ajouter le cas échéant, le débit d'eau nécessaire pour le refroidissement des ignitrons.

Il s'agit bien entendu de valeurs d'orientation, se rapportant aux cas moyens.

Dans le cas de machines en bout nous pouvons encore procéder autrement, en nous servant du diagramme donnant la valeur d'énergie (W) absorbée, *pour 100 soudures* exprimée en kWh, en fonction de la section soudée. Si (n) est le nombre des soudures devant être exécutées à l'heure, la puissance réelle absorbée correspondante sera de :

$$P_p \cos \varphi = W \frac{n}{100} \text{ en kW}$$

et le débit d'eau nécessaire :

$$D = 17\ W \frac{n}{100} \text{ l/heure.}$$

Pour des calculs plus précis il faut dissocier les pertes dans chaque partie de la machine, en tenant compte des remarques suivantes :

Une partie importante de la chaleur est libérée dans les pièces soudées et évacuée, soit avec celles-ci, soit avec les projections ou les gaz dégagés.

Une fraction de cette chaleur est transmise aux électrodes et les pièces avoisinantes; elle est d'autant plus grande, que le temps de soudage et de maintien après le soudage est plus long. Souvent (par exemple dans les soudeuses par points), une partie importante de cette chaleur est évacuée par eau.

Dans les câbles souples et dans les redresseurs refroidis, l'eau absorbe la presque totalité des pertes par l'effet Joule.

Dans les transformateurs, les pertes dans le cuivre peuvent être considérées comme transmises intégralement à l'eau, tandis que les pertes dans le fer sont en majeure partie évacuées par air.

Dans les connexions massives et les flexibles seule une très faible partie de chaleur passe dans l'eau, le reste étant évacué par le rayonnement, la convection dans l'air et la conduction vers les masses métalliques voisines.

Il y a enfin d'autres parties de la machine qui, tout en n'étant pas parcourues directement par le courant de soudage, peuvent demander à être refroidies, suite à un échauffement suscité, soit par la présence d'un champ magnétique alternatif intense, soit par le rayonnement des pièces soudées, soit par des pertes d'origine mécanique (comme certaines parties des circuits hydrauliques), etc.

CHAPITRE XI

LA CONCEPTION DES OUTILLAGES

DÉFINITIONS

Le soudage par résistance est une technique d'assemblage qui a pris une extension considérable.

De nombreux produits sont même inconcevables sans l'emploi du soudage par résistance.

Les cas d'assemblages étant infiniment divers, la production en série ne peut se concevoir qu'en faisant usage de gabarits ou d'outillages destinés à faciliter l'opération de soudage, à augmenter la précision, à augmenter le rendement des machines.

Tout comme pour une presse, les outillages doivent être étudiés pour chaque cas particulier, la machine à souder par résistance n'étant pas une machine universelle.

Cette constatation est valable pour :

— les machines à souder par point,

— les machines à souder au galet;

mais surtout pour :

— les presses à souder,

— les machines à souder en bout.

Nous avons mentionné les termes outillages et gabarits.

Il convient d'en donner une définition.

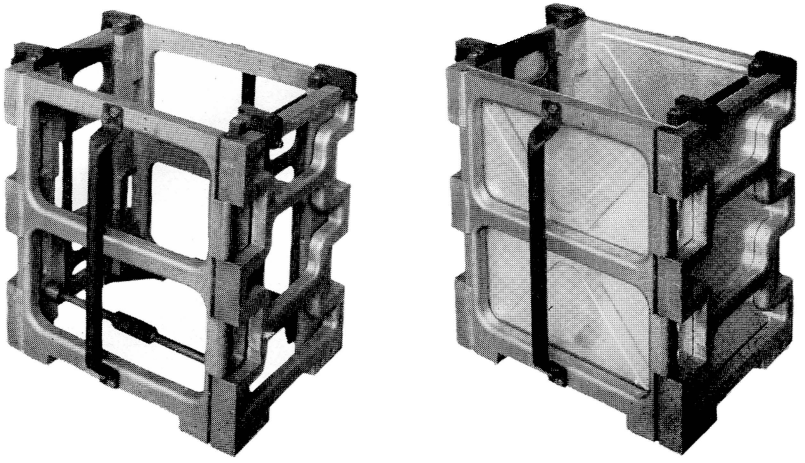


Fig. 441
Gabarit de soudage en aluminium.

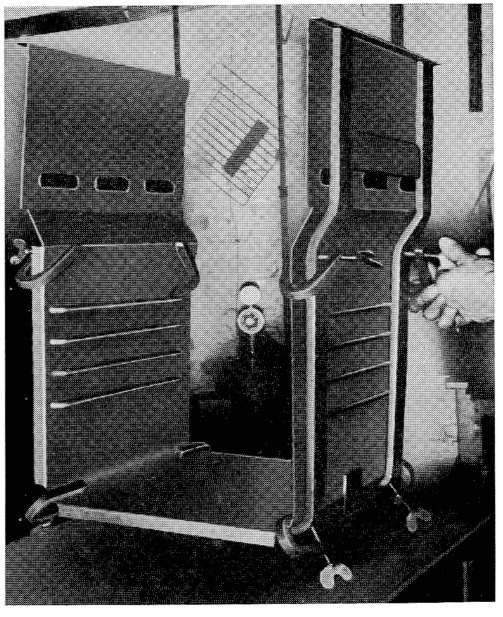


Fig. 442
Gabarit employé dans la fabrication des fourneaux électriques de cuisine.

GABARIT

Le gabarit est un appareillage destiné à maintenir et positionner les parties à assembler, mais qui ne peut être considéré comme faisant partie intégrante de la machine à souder. Une pince de soudage peut être amenée à un gabarit, ou un gabarit peut être introduit dans les bras d'une machine à souder par point.

Les figures 441 et 442 donnent des exemples de gabarits.

OUTILLAGE

L'outillage par contre, quoique également destiné à maintenir en place les pièces devant être assemblées peut être considéré comme faisant partie de la machine à souder.

Il peut être boulonné, soudé ou fixé de toute autre manière à la machine même.

Les figures 443, 444 et 445 montrent des outillages de machines à souder en bout; les figures 446, 447 et 448 des outillages de presses à souder.

La figure 449 montre un outillage pour le brasage.

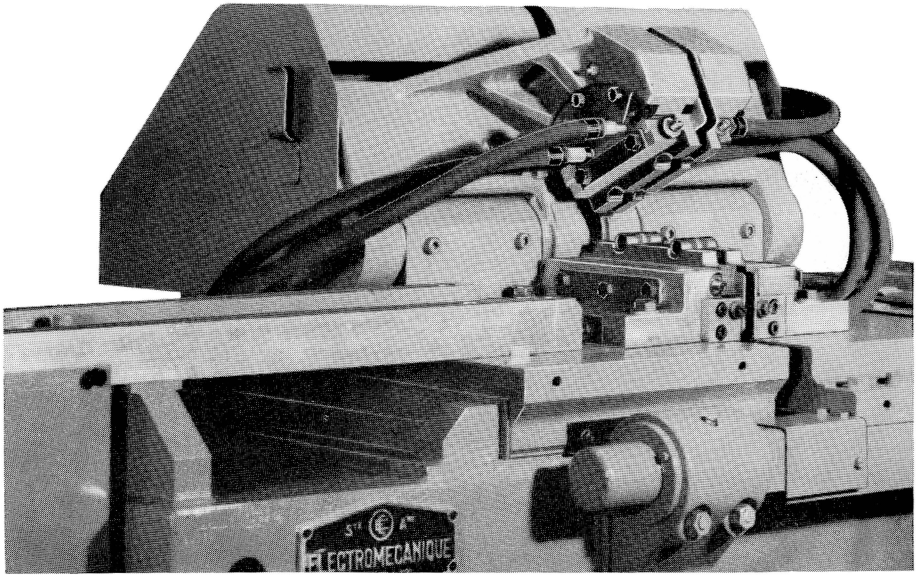


Fig. 443

Outillage pour la fabrication de bielles d'automobiles.

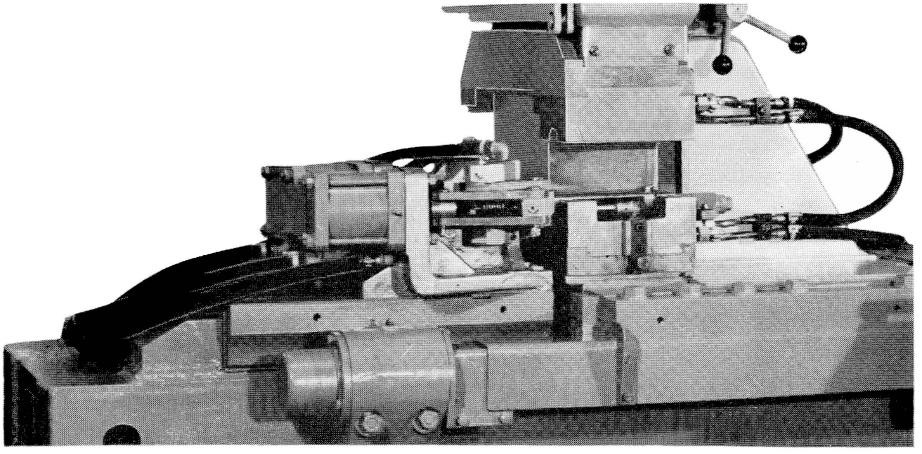


Fig. 444
Outillage de soudage en bout pour trompettes de voiture automobile.

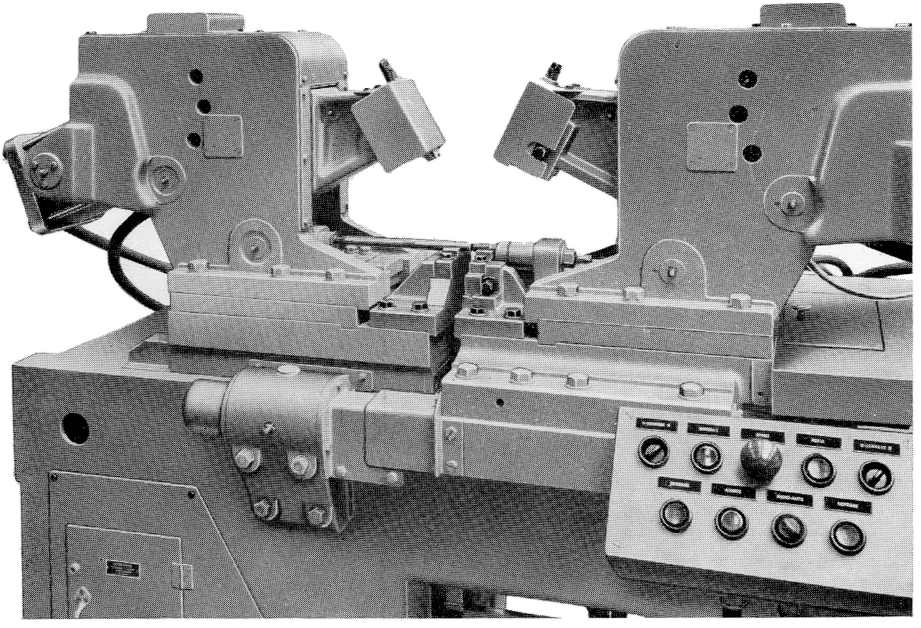


Fig. 445
Soudage d'aciers de nuances différentes (industrie automobile).

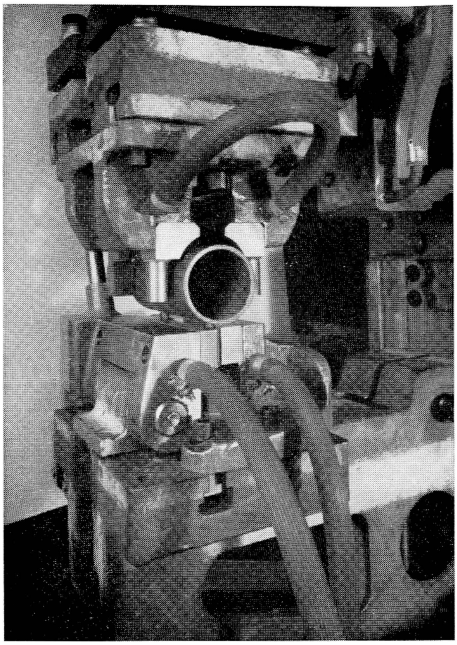


Fig. 446

Outillage pour le soudage d'oreillons sur tubes.

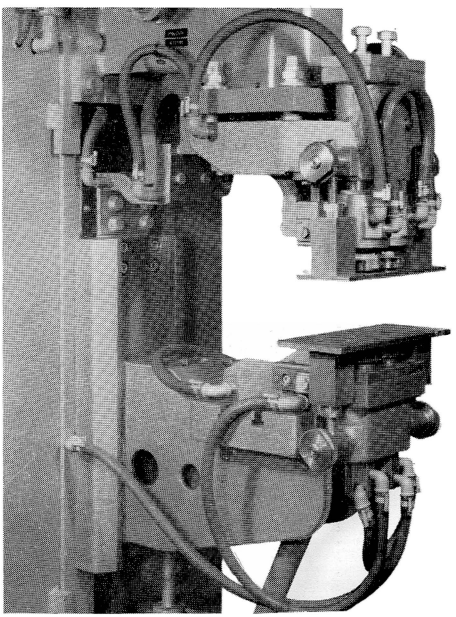


Fig. 447

Outillage spécial pour soudage d'oreilles de suspension sur tôles en cuivre.

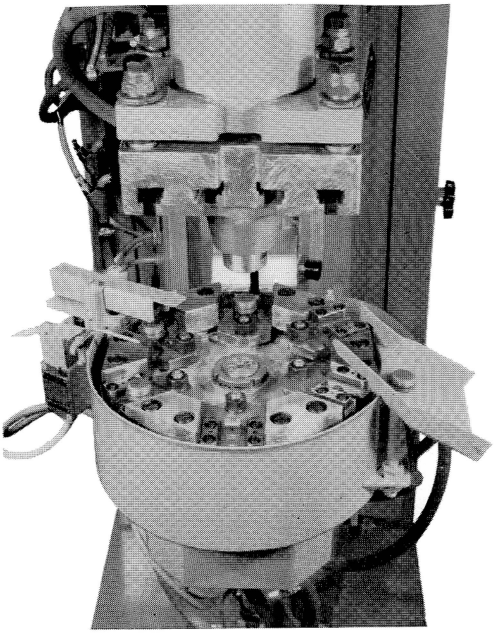


Fig. 448
Outillage rotatif.

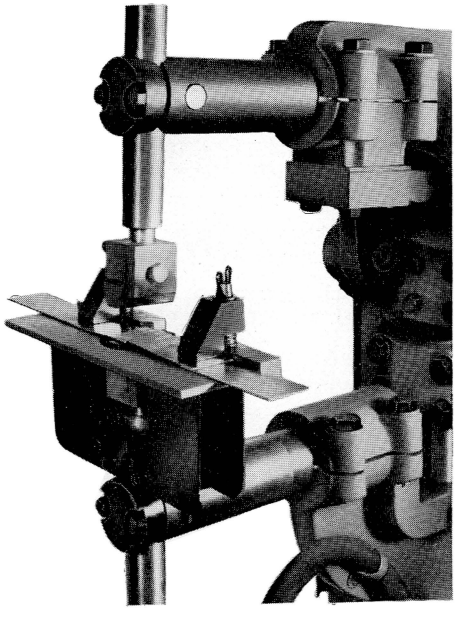


Fig. 449
Outillage pour le brasage.

Pratiquement tout travail de soudage par point, au galet, par bossage ou en bout, peut être positionné soit par gabarit, soit par outillage.

Il est tout naturel que l'emploi de ces outillages et gabarits soit le plus fréquent là où il y a haute production en série, mais leur importance est également très grande dans le cas de petites séries. Les outillages et gabarits sont des pièces coûteuses, leur conception étant souvent compliquée. Avant d'entamer la fabrication de tels outillages, il convient toujours d'étudier attentivement les opérations de soudage à réaliser.

En fait, les outillages et gabarits sont employés, pour :

— Positionner les pièces correctement et les maintenir fermement durant l'opération de soudage.

— Rendre possible l'utilisation d'une machine existante pour un travail différent de celui pour lequel elle a été primitivement acquise, ou pour plusieurs applications différentes.

— Permettre l'emploi d'une main-d'œuvre non qualifiée ou semi-qualifiée.

— Obtenir une plus grande précision et une constance de qualité des produits manufacturés.

— Dans certains cas, permettre l'automatisation complète d'une opération de soudage.

Il existe plusieurs outillages spéciaux standards qui permettent de résoudre des problèmes de soudage courants.

L'étau de serrage de la figure 450 s'adapte sur le bras supérieur ou inférieur d'une machine à souder par point. Il permet de serrer de petites pièces, par exemple : rond à souder en T sur tôle.

L'outillage de la figure 451 s'adapte également sur le bras d'une machine à souder par point et permet d'atteindre des endroits de l'assemblage autrement inaccessibles.

Le nombre de ces outillages « standards » est limité et, dans la majorité des cas, il est nécessaire de fabriquer des outillages spéciaux ou des gabarits.

Le constructeur de machines à souder par résistance réalise généralement les premiers outillages. Il les livre avec la machine et résout ainsi le problème posé par son client.

Mais, il va de soi, qu'après quelques années l'emploi de la machine acquise varie, que la production de l'utilisateur s'oriente vers d'autres solutions ou d'autre formes...

L'utilisateur se voit dans l'obligation de réaliser des outillages lui-même.

Cette méthode est d'ailleurs parfois plus efficace que de s'adresser au constructeur de machines à souder car celui-ci n'est en général pas spécialiste dans le travail de son client et n'a pas l'expérience pratique que ce dernier possède de l'utilisation de la machine.

On trouvera ci-après quelques points essentiels et quelques conseils pratiques pour la conception des outillages de soudage.

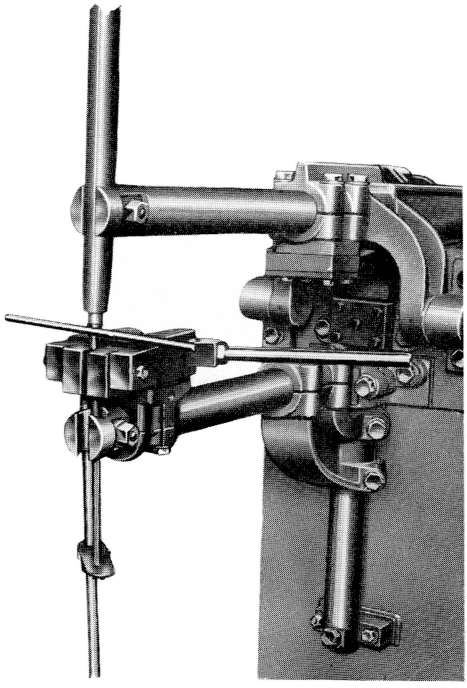


Fig. 450

Etau de serrage adaptable au bras inférieur ou supérieur d'une machine à souder.

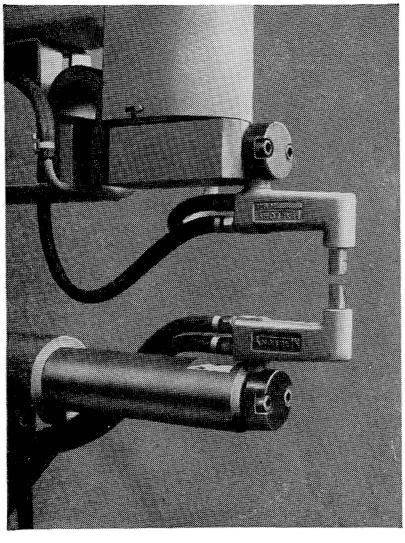


Fig. 451

Outillage permettant d'atteindre des endroits de l'assemblage difficilement accessibles.

CHOIX DES MATÉRIAUX

Cuivre

Le matériau le plus employé est le cuivre qui, correctement allié, offre une résistance mécanique excellente, tout en assurant des conductibilités thermique et électrique maximales.

De plus, le cuivre n'est pas magnétique.

Aluminium

On peut employer l'aluminium ou l'alliage d'aluminium lorsqu'il est indispensable d'avoir un poids réduit (cas du gabarit devant être transporté vers la soudeuse). Il présente les avantages du cuivre en ce qui concerne la conductibilité thermique et électrique. L'aluminium n'est pas magnétique.

Bronze d'aluminium

Dans le cas où les outillages doivent subir des efforts importants (cas de mâchoires pour machines à souder en bout où des efforts de serrage de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes sont appliqués), certains bronzes d'aluminium sont avantageux car ils offrent une résistance mécanique parfois supérieure à celle de l'acier tout en présentant une bonne conductibilité thermique et électrique.

L'acier inoxydable

Pour des pièces devant présenter une haute résistance mécanique, mais ne devant pas être parcourues par le courant de soudage, on emploiera l'acier inoxydable qui n'est pas magnétique en dessous d'une température de quelques centaines de degrés Celsius.

Les caractéristiques de conductibilités thermique et électrique et le fait que ces matériaux ne sont pas magnétiques en déterminent le choix.

En effet :

a) Le circuit de soudage est parcouru par des courants de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'ampères.

Ce courant provoque dans les parties du circuit qu'il parcourt des échauffements proportionnels aux résistances électriques de ces parties. C'est pourquoi une résistivité électrique très faible est intéressante car elle ne limite pas la valeur du courant de soudage et il ne se développe qu'une quantité de chaleur relativement peu importante dans les pièces mêmes. Les matériaux employés doivent donc être de bons conducteurs électriques.

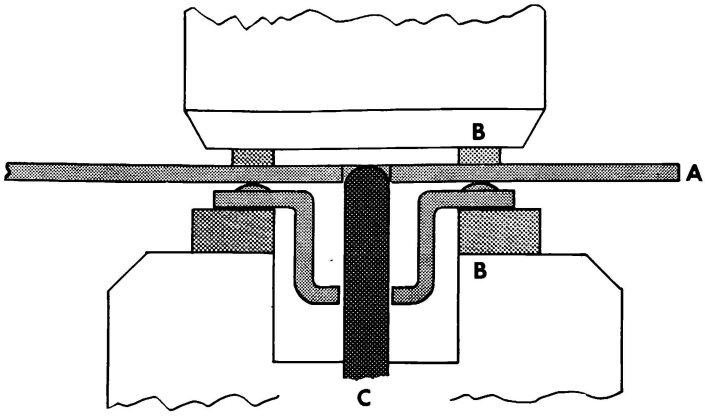


Fig. 452

Exemple d'isolation.

A : pièces à souder
B : électrodes
C : tige de localisation isolée

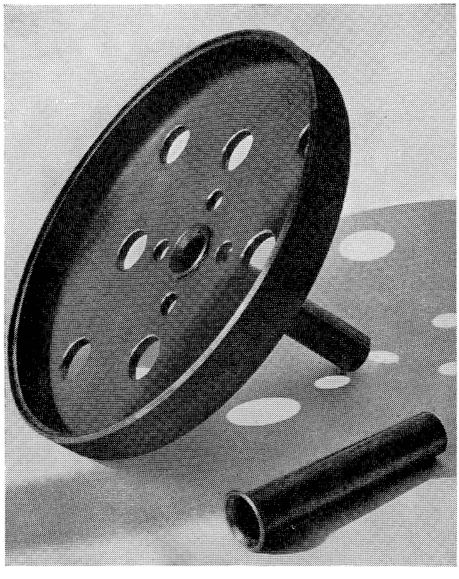


Fig. 453

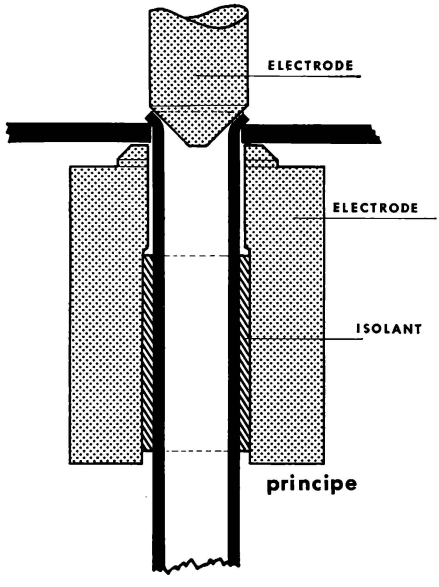


Fig. 454

Sertissage de tubes sur plaques

b) On est assuré d'une bonne conductibilité thermique qui est intéressante car elle facilite l'évacuation de la chaleur développée dans les pièces parcourues par le courant. Le refroidissement des parties conductrices se fait grâce à des tuyaux parcourus par l'eau de refroidissement.

Ces tuyaux peuvent être coulés dans la masse, mais ils peuvent aussi être soudés à l'étain dans des rainures prévues à cet effet. Les alliages de cuivre s'accommodent fort bien du soudage à l'étain.

c) L'espace situé aux alentours immédiats du circuit parcouru par le courant de soudage est le siège de champs magnétiques intenses provoqués par les intensités importantes du courant de soudage.

La présence dans ce champ de pièces magnétiques peut l'influencer de façon telle que l'opération de soudage peut devenir éventuellement impossible (si les parties magnétiques sont très massives). Elle réduit l'intensité de courant par l'augmentation de l'impédance du circuit de soudage.

D'autre part toute pièce magnétique placée dans un champ s'échauffe par suite des courants induits dans celle-ci (courants de Foucault). Cet échauffement peut être très important et atteindre plusieurs centaines de degrés Centigrade. Si les pièces sont pourvues de parties pivotantes, axes, etc., il peut en résulter un grippage. C'est pourquoi les matériaux à employer pour la confection d'outillages et gabarits doivent être amagnétiques.

ISOLATION

Certaines parties des outillages ou gabarits doivent être parfaitement isolées. Ces parties comprennent axes, pointeaux de localisation, clames ou dispositifs de localisation des pièces à souder qui entrent en contact avec des parties conductrices du courant ou avec les pièces à souder elles-mêmes (fig. 452).

La bakélite ou le carton isolant fournira l'isolation nécessaire qui ne doit d'ailleurs pas être très grande étant donné les tensions relativement faibles employées dans le circuit de soudage des machines à souder par résistance (fig. 453 et 454).

DIMENSIONS DES OUTILLAGES ET GABARITS

Celles-ci doivent être les plus réduites possible pour bien dégager l'accès et faciliter le chargement ainsi que pour obtenir une légèreté facilitant le maniement dans le cas de gabarits. Il faut néanmoins tenir compte des limites de résistance mécanique, de la section de passage du courant et de la durée de vie que l'on désire donner à l'outillage.

REMPLACEMENT ET CHANGEMENT D'OUTILLAGE

Les outillages ou gabarits doivent être conçus de façon à être remplacés rapidement et à permettre une mise en production rapide en évitant les réglages d'outillages précis et longs. Ils doivent également protéger l'opérateur, c'est-à-dire ne pas être dangereux (fig. 455).

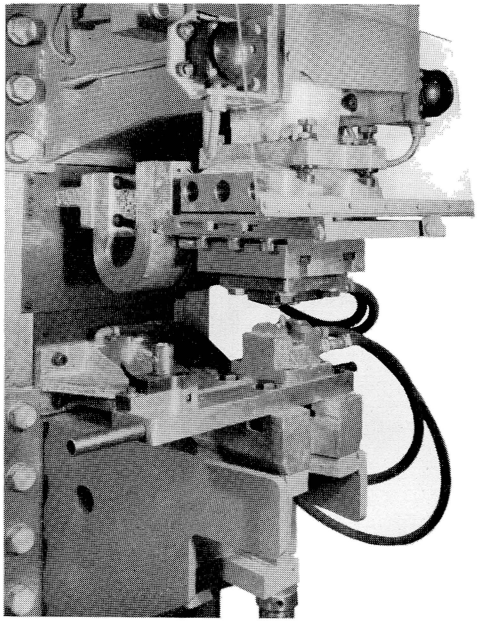


Fig. 455
Tables rainurées pour l'adjonction rapide d'outillages.

DÉGAGEMENT DES PIÈCES SOUDÉES

Le soudage est une opération de construction à l'encontre d'autres opérations sur machines-outils qui ne sont que des opérations de transformation, telles par exemple : découpes, estampage, pliage.

En effet, avant soudage, les pièces à assembler sont séparées. Elles sont localisées telles que dans les gabarits et outillages.

Après soudage, c'est un ensemble, une seule pièce, qu'il y a lieu de dégager du dispositif. Les outillages et gabarits seront donc conçus de façon à rendre le dégagement possible mais aussi de façon à ce qu'il soit rapide et aisé. Il faut éviter de longs dégagements de clames, des serrages de vis de fixation, etc. (fig. 456 et 457).

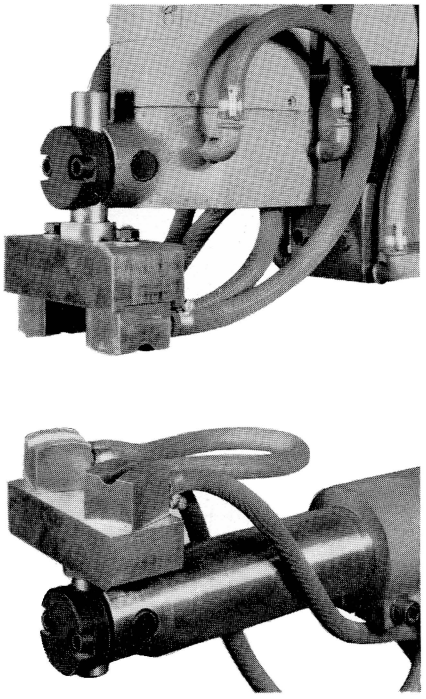


Fig. 456

Outillage de localisation pour le soudage d'une chaise en tubes.

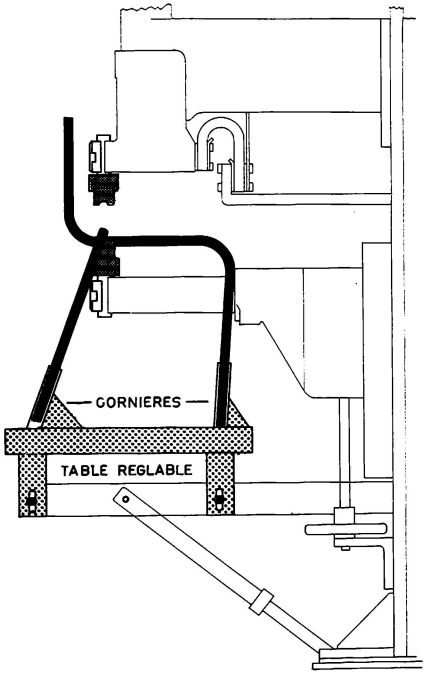


Fig. 457

Schéma de table de localisation pour le soudage d'une chaise en tubes.

REFROIDISSEMENT

Le refroidissement par giclage ou le soudage sous eau sont des modes de refroidissement parfois employés. L'oxydation ultérieure des pièces soudées est néanmoins un grand désavantage. Il est par conséquent préférable de prévoir un refroidissement interne des pièces sujettes à échauffement. Ce refroidissement peut se faire grâce à des tubes coulés dans les pièces ou, lorsque les outillages et gabarits ne comportent pas de pièces coulées, au moyen de tubes soudés à l'étain dans des rainures fraisées à cet effet (fig. 458).

Le refroidissement par air peut dans certains cas être suffisant : lorsque les parties des outillages sont massives et offrent une surface de refroidissement importante ou lorsque la cadence de soudage est réduite, ce qui est rarement le cas puisque l'emploi de gabarits et outillages se fait pour accélérer la production.

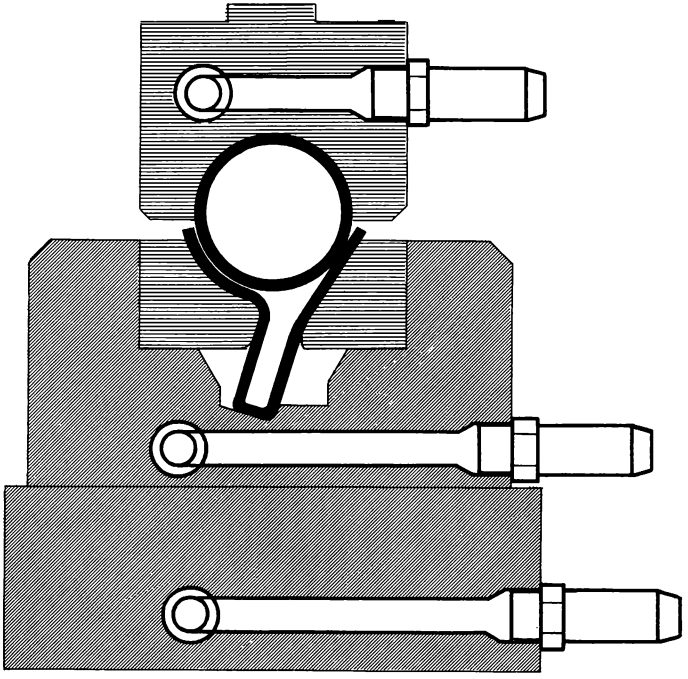


Fig. 458
Schéma du circuit de refroidissement de pièces d'outillage.

RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Les parties assemblées par n'importe quel procédé de soudage par résistance sont sujettes à des efforts de soudage importants et destinés à assurer un bon forgeage après que la chaleur ait été développée dans les pièces à assembler. Les gabarits et outillages doivent donc être construits de façon à résister à ces efforts sans déformation exagérée.

Même les outillages et gabarits les plus robustes subiront des déformations si le dessinateur n'élimine pas les soudures exécutées en porte-à-faux ou excentrées et s'il ne prévoit pas le placement des outillages dans l'axe des efforts.

USURE

Les outillages et gabarits doivent être construits de façon à permettre une certaine usure des électrodes. Aussi résistant que soit l'alliage employé pour les électrodes, on constatera toujours une usure. Des pertes de temps appréciables seront évitées si le dessinateur prévoit cette usure, car l'outillage s'adaptera automatiquement à celle-ci.

DENSITÉS DE COURANT ADMISSIBLE

Certaines parties des outillages et gabarits amènent le courant de soudage aux pièces à assembler. Afin de permettre un passage aisé du courant, il y a avantage à réduire les assemblages dans le circuit car chaque résistance de contact est le siège d'un dégagement d'énergie calorifique et occasionne une chute de tension. Il est vrai que la résistance de contact est très faible; mais il faut tenir compte du fait que l'intensité du courant est très élevée. Pour cette raison les sections de passage du courant de soudage seront suffisantes pour éviter ces inconvénients. Les pièces en cuivre et aluminium peuvent admettre une densité de 2 à 3 A/mm^2.

Si ces parties sont refroidies par circulation d'eau, on peut admettre que la capacité de conduction du courant est doublée.

PROJECTIONS

En soudage en bout par étincelage, une précaution supplémentaire doit être prise. Il faut protéger les outillages des particules métalliques provenant de l'étincelage. Le dépôt des projections peut provoquer des court-circuits, détériorer les mâchoires et provoquer le grippages des axes. Il est parfois indispensable de prévoir le nettoyage par soufflage d'air comprimé après chaque soudure.

BIBLIOGRAPHIE

Publications de la S.A. ELECTROMÉCANIQUE, Bruxelles.

« La Résistance Mécanique des points soudés et des assemblages soudés par points » par le professeur L. VANDEPERRE. (Publication du Laboratoire de connaissance des Matériaux annexé à la Faculté des Sciences appliquées de l'Université Libre de Bruxelles).

Resistance Welding Manual, édité par R.W.M.A., U.S.A.

Resistance Welding Data Book, édité par MALLORY, Londres.

Resistance Welding, par Wallace E. STANLEY.

Welding Journal, publié par American Welding Society, et notamment dans le numéro d'avril 1961 : « Le soudage par bossages » d'après J.F. HARRIS et J.J. RILEY.

Imprimerie Bayeusaine, rue Royale, Bayeux - 4285 - 1-65 - Dépôt légal 4678 - 4e trim. 1964
Imprimé en France